

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Snímače otáček a polohy pro oblast automobilového průmyslu

**Speed and position sensors for use in area of automotive
industry**

2010

Vojtěch Roh

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Univerzitní studijní programy

Zadání bakalářské práce

Student:

Vojtěch Roh

Studijní program:

B3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906R007 Automobilová elektronika

Téma:

Snímačec otáček a polohy pro oblast automobilového průmyslu

Speed and Position Sensor for Use in Area of Automotive Industry

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte rešerši koncepčních řešení a funkčních vlastností snímačů otáček a polohy pro oblast automobilové elektroniky.
2. Provedte návrh a realizaci laboratorního stanoviště pro měření vlastností snímačů otáček a polohy motorových vozidel.
3. Ověřte funkčnost realizovaného modelu a dle pokynů vedoucího bakalářské práce sestavte typizovanou laboratorní úlohu.
4. Vypracujte vzorový protokol k měření pro předmět Automobilová elektronika.

Seznam doporučené odborné literatury:

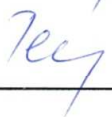
Podle doporučení vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Šimoník, Ph.D.**

Datum zadání: 02.11.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.
prorektor pro studium

„Prohlašuji že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

Ostrava, 21.5. 2010

Vojtěch Roh

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Petru Šimoníkovi, Ph.D. za odborné vedení a rady poskytnuté v průběhu řešení této práce.

Ostrava, 21.5. 2010

Vojtěch Roh

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou současných snímačů otáček a polohy v oblasti automobilového průmyslu. Obsahuje rešerši koncepčních řešení a funkčních vlastností nejznámějších a nejčastěji používaných snímačů otáček, popis fyzikálních principů a konstrukčních řešení těchto snímačů. Největší pozornost je v rešerši věnována popisu snímačů indukčních a Hallovyých, jelikož ty se v dnešní době jeví pro snímání otáček v oblasti automobilového průmyslu jako nejpoužívanější. Stěžejní částí této bakalářské práce je návrh a pak především realizace laboratorního modelu pro měření vlastností snímačů otáček a polohy. Je zde i typizovaná laboratorní úloha pro měření na realizovaném laboratorním stanovišti a také vypracovaný vzorový protokol z měření podle bodů zadání laboratorní úlohy.

Klíčová slova

Indukční snímač polohy klikové hřídele, Hallův snímač, setrvačnický, vačkový hřídel, laboratorní stanoviště, řemenice.

Abstract

This bachelor thesis covers the topic of current speed and position sensors in a field of automotive industry. well-known and the most-used speed sensors, description of principles of physics and constructional solutions of those sensors. The major part of the recherche is devoted to description of inductive and Hall sensors, because those seem to be the most used ones form speed sensing in a field of automotive industry now days. The main part of this bachelor thesis is then a suggestion and also the realization of the laboratory model for measuring the qualities of speed and position sensors. There is also a standardized laboratory task for measuring on a realized laboratory station and a model protocol from measuring according to the points set by a laboratory task.

Key words

Inductive crankshaft position sensor, Hall sensor, flywheel, camshaft, laboratory stand, pulley

Obsah

Úvod	7
1 Snímače a čidla v automobilovém průmyslu	8
1.1 Odporové snímače polohy	9
1.1.1 Potenciometrický snímač pedálu akcelerace	9
1.1.2 Snímač hladiny paliva v nádrži	9
1.1.3 Snímač polohy škrticí klapky	10
1.2 Indukční snímače otáček	11
1.2.1 Indukční snímač otáček klikové hřídele	12
1.3 Hallovy snímače otáček	14
1.3.1 Snímač otáček vačkového hřídele	16
1.3.2 Diferenciální Hallovy snímače	18
1.3.3 Snímače otáček kol	18
1.4 Snímače úhlu natočení volantu	20
1.4.1 Hallův snímač natočení volantu	20
1.4.2 Indukčnostní snímač uhlu natočení volantu v servořízení	20
1.5 Optoelektrické snímače otáček	20
2 Návrh laboratorního stanoviště	21
2.1 Návrh kritérií	21
2.1.2 Hlavní parametry modelu	21
2.1.3 Stručný popis laboratorního stanoviště	21
2.1.4 Uchycení setrvačníku na hřídeli	22
2.1.5 Konstrukce uložení hřídele pro setrvačnick	23
2.1.6 Uložení hřídele pro řemenici vačky	24
2.1.7 Rám	24
2.1.8 Hnací mechanismus	25
2.1.9 Elektromotor	27
2.1.10 Čelní panel	29
2.1.11 Uchycení snímačů	29
2.1.12 Použité snímače	30
2.2 Realizace	32
3 Ověření funkčnosti	34
3.1 Typizovaná laboratorní úloha	35
4 Vzorový protokol	36
Závěr	37

Úvod

V současnosti se snímače používají téměř ve všech oblastech průmyslových systémů a výrobků. Moderní motorová vozidla jsou díky stále se zvyšujícím nárokům na bezpečnost jízdy, komfort, účinnost, hospodárnost a šetrnost vůči životnímu prostředí čím dál tím více vybavena elektronickými systémy a tím pádem celou řadou snímačů a čidel. Snímače by se daly přirovnat ke smyslovým orgánům vozidla, kterými se sleduje rychlost, otáčky, úhel, dráha, teplota, hmotnost, moment, tlak, průtok atp. Snímače jsou druhem převodníků. Většina snímačů je elektrických nebo elektronických a tyto vždy převádějí měřenou neelektrickou veličinu na elektrickou.

Postupná miniaturizace snímačů je důvodem ke stále zvyšujícímu se zájmu o tento artikl na trhu. V Evropě je v současnosti na trhu více jak sto tisíc typů snímačů a světový trh se snímači dále prudce narůstá. Tento fakt vede k dalšímu a neustálému vývoji v této oblasti. Nepřeberné množství vyráběných snímačů komplikuje volbu vhodného snímače pro daný účel. Jsou dostupné snímače pro téměř každou veličinu.

1 Snímače a čidla v automobilovém průmyslu

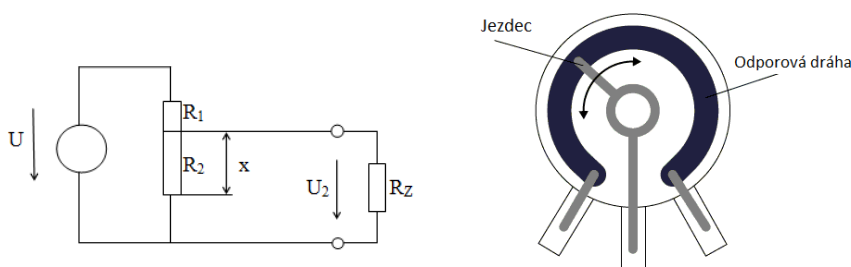
Moderní motorová vozidla jsou díky stále se zvyšujícím nárokům na bezpečnost jízdy, komfort, účinnost, hospodárnost a šetrnost vůči životnímu prostředí čím dál tím více vybavována elektronickými systémy a tím pádem celou řadou snímačů a čidel. Snímače vždy převádějí měřenou neelektrickou veličinu na elektrickou. Jednotlivé veličiny mohou být sledovány průběžně, snímač tak stále poskytuje informaci o aktuálním stavu a změnách měřené veličiny. V dalším případě mohou být signalizovány jen určité stavy jako např. kritické množství nebo teplota.

Výstupní signály ze snímačů nesoucí informaci o stavu jsou přiváděny na vstupy řídicích jednotek. Řídicí jednotky na základě těchto informací ze snímačů a informací o požadované hodnotě provádí výpočty a nastavení výstupních akčních členů za cílem regulace dané veličiny nebo časování a řízení různých procesů. Řídicí jednotka spolupracuje s větším počtem snímačů současně a zároveň i s dalšími řídicími jednotkami. Informuje řidiče a stavu důležitých veličin a při vyhodnocení závady zapisuje tuto do paměti závad. Signály vedené ve voze mohou být často ovlivňované rušením a zkreslením, což snižuje přesnost měření. Proto bývají často v čidlech zakomponované A/D převodníky. Ty převádí spojitý signál do digitální nespojitě podoby. Digitální signál není totiž zdaleka tolik náchylný na rušení a jeho přenos je méně problémový. Tím je docíleno přesnějšího měření. Přenos digitálního signálu je většinou řešen sériově. Dále bývají čidla mnohdy osazena přizpůsobovacím obvodem, který upravuje signál ze snímače na určitý normovaný tvar (daný rozsah napětí a proudu) aby bylo možné přenést signál bez zarušení. Snímače lze také navíc doplnit jednočipovým mikropočítačem který může například automaticky provádět korekci měřené veličiny. Tyto snímače s A/D převodníky a přizpůsobovacími obvody se nazývají inteligentní snímače. Kvůli požadavku na kompaktnost a robustní provedení snímače bývají doplňující obvody většinou integrovány přímo v těle snímače a tvoří s ním mechanický celek. Na snímače v automobilovém průmyslu jsou kladeny velké nároky plynoucí z jejich umístění a mnohdy nepříznivých okolních podmínek. Mezi hlavní požadavky určitě patří: spolehlivost, robustnost, malé rozměry, nízká cena.

1.1 Odporové snímače polohy

V mnoha výpočtech řídicí jednotka potřebuje znát polohu mechanických komponentů jako je například poloha škrtkové klapky, poloha pedálu akcelerace, výška hladiny paliva v nádrži atp. Pro tyto aplikace se nejčastěji používají odporové snímače polohy.

Jednoduchý a spolehlivý snímač k průběžnému sledování polohy je proměnný rezistor v zapojení jako měřicí potenciometr nebo reostat. Působením měřené neelektrické veličiny se mění poloha pohyblivého kontaktu (jezdce) vůči odporové dráze, která je přímočará nebo kruhová. Na jezdcu potenciometru je napětí úměrné k jeho poloze. Vhodnou konstrukcí této dráhy lze poměrně snadno dosáhnout různého funkčního průběhu mezi elektrickým odporem a polohou jezdce. Odporová dráha musí být zatěžována pouze malým proudem (1 mA), aby se neohřívala. Nevýhodou je mechanické opotřebení a nadzvednutí jezdce při velkém zrychlení a vibracích. [1]



Obr. 1 – Odporový dělič, potenciometr

1.1.1 Potenciometrický snímač pedálu akcelerace

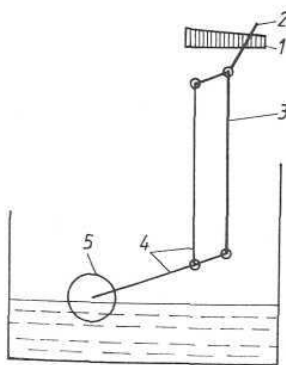
U elektronického řízení motoru přebírá snímač polohy pedálu akcelerace funkci mechanického spojení pedálu se škrtkovou klapkou zážehového motoru, případně vstřikovacím čerpadlem u vznětového motoru. Hlavní součástí snímače je jednoduchý potenciometr připevněný k pedálu, na kterém se mění napětí v závislosti na poloze. Toto napětí je následně v řídicí jednotce převedeno podle převodní charakteristiky uložené v paměti na dráhu pedálu, případně úhel natočení hřídele pedálu. Vyhodnocuje se nejen aktuální poloha/úhel natočení hřídele pedálu, ale také její rozdíl oproti předchozímu stavu a rychlost sešlápnutí pedálu. Podle toho řídicí elektronika může přizpůsobit výkon motoru podle požadavku řidiče na zrychlení. Tato informace může být sdílena i pro další systémy ve vozidle.

1.1.2 Snímač hladiny paliva v nádrži

Snímač hladiny paliva má za úkol snímat aktuální stav hladiny palivové nádrže a dodávat odpovídající signál řídicí jednotce nebo ukazateli na přístrojové desce vozidla. Spolu s elektrickým palivovým čerpadlem, palivovým filtrem, atd. je součástí vestavných modulů, které jsou umístěny v palivových nádržích na benzín nebo naftu a zajišťují bezporuchové zásobování motoru palivem.[1]

Snímač hladiny se skládá z plováku připevněného na rameno jezdce potenciometru, který mění svou polohu na odporové dráze podle aktuální výšky paliva v nádrži.

Další možnost měření hladiny paliva v nádrži je pomocí kapacitních snímačů. Tyto se skládají ze dvou navzájem izolovaných kovových trubiček, které tvoří desky kondenzátoru. Kapacitní reaktance mezi trubičkami vzrůstá s rostoucí hladinou kapaliny. Změna kapacitní reaktance je dále v měřicím obvodu převedena na změnu napětí.



Obr. 2 – plovákový snímač hladiny paliva v nádrži

1.1.3 Snímač polohy škrticí klapky

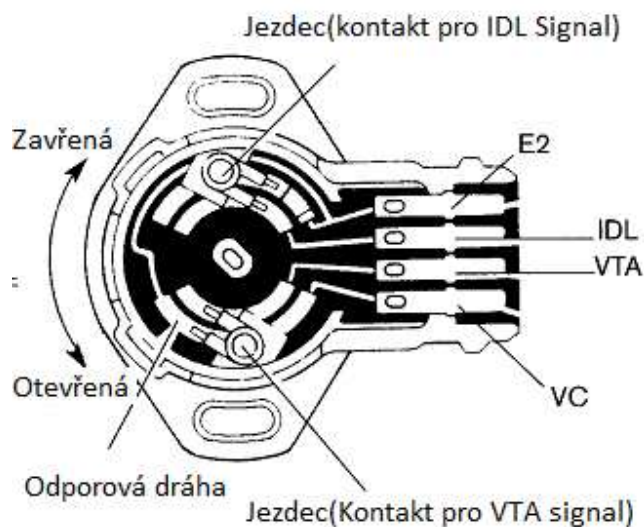
Snímá úhel natočení škrticí klapky zážehového motoru. Snímač polohy škrticí klapky je připevněn na tělese škrticí klapky a je spojen s jejím hřídelem. Potenciometr vyhodnocuje úhel natočení a přenáší poměr napětí přes odporové zapojení do řídicí jednotky.[2]

Výstupní signál ze snímače je používán řídicí jednotkou, ta podle informace o aktuální poloze a také podle rychlosti změny polohy škrticí klapky určuje časování zapalování a vstřikování paliva. Například při rychlém otevření škrticí klapky řídicí jednotka může rozhodnout o extra velké dávce paliva vstřikované do motoru.

Hmotnost nasávaného vzduchu je v řídicí jednotce určena z natočení škrticí klapky a příslušných otáček motoru, přičemž změna hustoty vzduchu závislosti na teplotě je zohledněna vyhodnocením signálu ze snímače teploty nasávaného vzduchu.[2]

Při použití snímače škrticí klapky jako hlavního snímače zatížení, jsou kladeny vyšší nároky na přesnost měření. Té je dosaženo třeba použitím dvou potenciometrů.

Některé škrticí klapky jsou dnes místo odporových snímačů opatřeny moderním bezkontaktním měřením pomocí snímačů polohy využívajících Hallův jev.



Obr. 3 Potenciometrický snímač otevření škrtkovací klapky

IDL	...	signál je 0V při úplně uzavřené škrtkovací klapce
E2	...	GND
VC	...	VCC
VTA	...	0,6 – 0,9V = uzavřená, 4,5 – 4,7V = plně otevřená

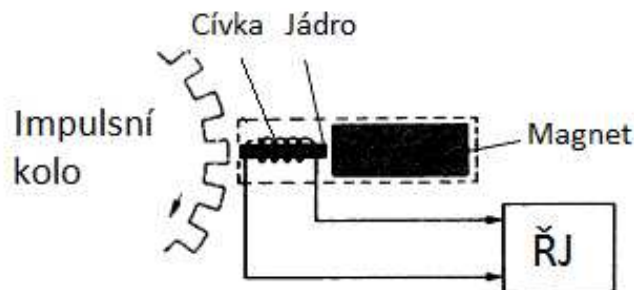
1.2 Indukční snímače otáček

Skládají se obecně ze tří hlavních magnetických součástí: nehybná cívka, část magneticky měkkého železa, trvale magnetická část.[3]

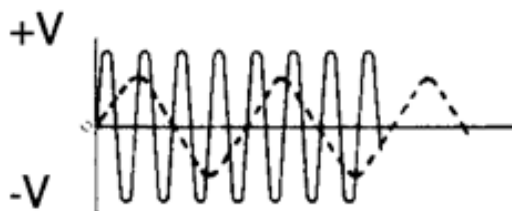
Změna magnetického toku potřebná k vytváření výstupního napětí je způsobována otáčením ozubeného kola. V cívce, která je pevně spojená s permanentním magnetem, se indukuje změnou magnetického toku střídavé napětí přibližně sinusového průběhu. Indukované napětí v cívce je úměrné změně (derivaci) magnetického toku. Amplituda signálu je přímo úměrná vzduchové mezeře mezi snímačem a ozubeným kolem, velikosti zubů a především otáčkám ozubeného kola. Proto se prahové hodnoty vstupních obvodů v řídicí jednotce dynamicky přizpůsobují otáčkám. Řídicí jednotka také musí být schopna vyhodnotit velmi slabý signál. Výstupní vodiče bývají odstíněné pro vyloučení modulace rušivého napětí na přenášený signál. Výstupní napětí snímače se také někdy tvaruje pomocí Schmittova obvodu na pravoúhlý průběh.

- Výhodou induktivních snímačů jsou nízké výrobní náklady, odolnost proti rušení, žádná elektronika ve snímači, velký teplotní rozsah a absence napájení.
- Nevýhodou je závislost výstupního napětí na otáčkách a citlivost na výkyvy velikosti vzduchové mezery. Ne všechny rotory musí být ozubené, pro stejnou funkci stačí drážkování.

Používají se ve snímači klikového hřídele, snímači otáček kol, snímači vačkového hřídele a ve snímači pohybu jehly vstřikování.



Obr. 4 – Indukční snímač otáček

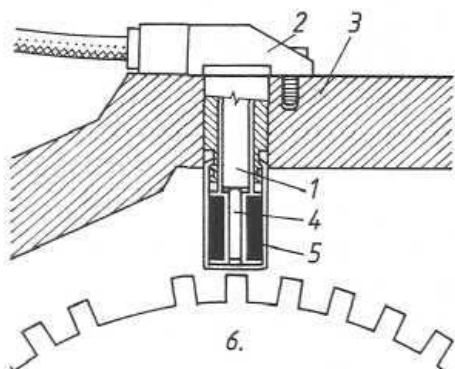


Obr. 5 - Výstupní signál pro nízké(čárkovaná) a vysoké(plná) otáčky

1.2.1 Indukční snímač otáček klikové hřídele

Písty všech válců jsou přes ojnice spojeny s klikovým hřídelem. Poloha pístu prvního válce je použita jako měřicí veličina pro stanovení bodu zážehu. Jeden snímač na klikovém hřídeli proto udává informaci o poloze pístů ve všech válcích. Tento snímač získává informaci o poloze klikového hřídele, ze které je pak v řídicí jednotce odvozena informace o otáčkách klikového hřídele za minutu. Přesto u něj zdomácnělo označení snímač otáček.[2]

Ozubený feromagnetický kotouč který je součástí snímání otáček induktivním snímačem jehož zuby jsou potřené pro změnu magnetického pole ve snímači a generování signálu o otáčkách je připevněno na klikovém hřídeli. Většinou v prostoru setrvačníku v bezprostřední blízkosti ozubení pro pastorek startéru. Tento ozubený kotouč bývá též nazývaný jako impulsní kolo. V ozubení jsou 2 zuby vynechány, tato mezera představuje vztahnou značku určité výchozí polohy klikového hřídele. Počet zubů indukčního kola závisí na daném použití. U systémů s elektromagnetickými vstřikovacími ventily bývá $60 - 2 = 58$ zubů. Jiné provedení impulsního kola má například pro každý válec jeden zub. U čtyřválcového motoru připadají potom na jednu otáčku 4 impulsy (4 zuby). Indukční snímač snímá posloupnost těchto zubů. Indukuje se střídavé napětí. Dostačující amplituda výstupního signálu je k dispozici nejméně od 2 otáček za minutu. [2]



Elektromagnetický (indukční) snímač

1 — permanentní magnet

2 — těleso snímače

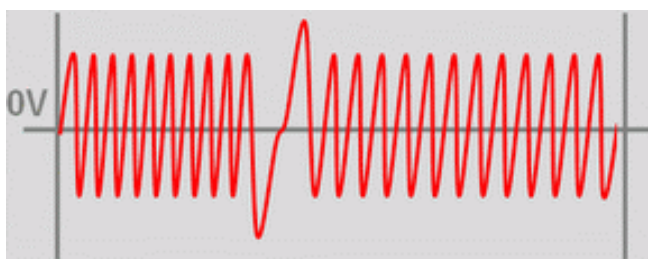
3 — skříň motoru,

4 — jádro z měkké oceli

5 — vinutí cívky

6 — ozubení (např. věnec setrvačníku,
impulsní kolo – vynechány 2 zuby)

Obr. 6 – Konstrukce indučního snímače otáček

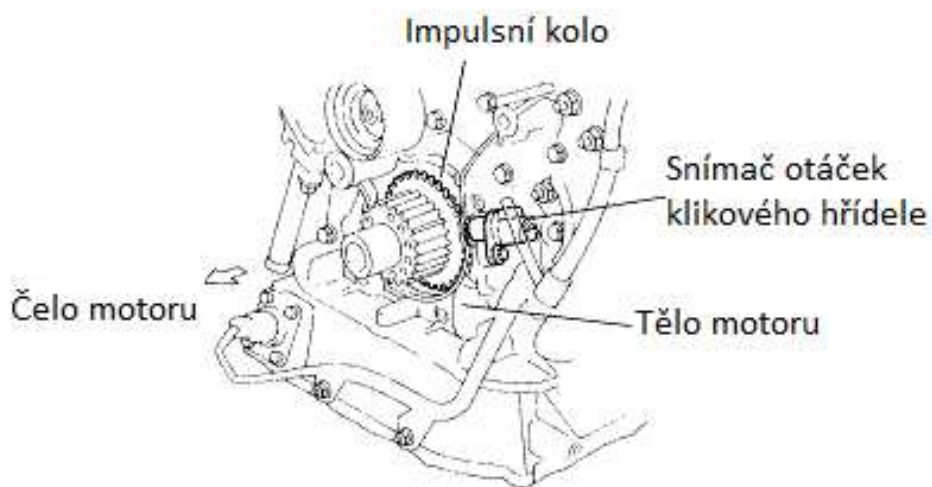


Obr. 7 - Signál ze snímače otáček na klikovém hřídele

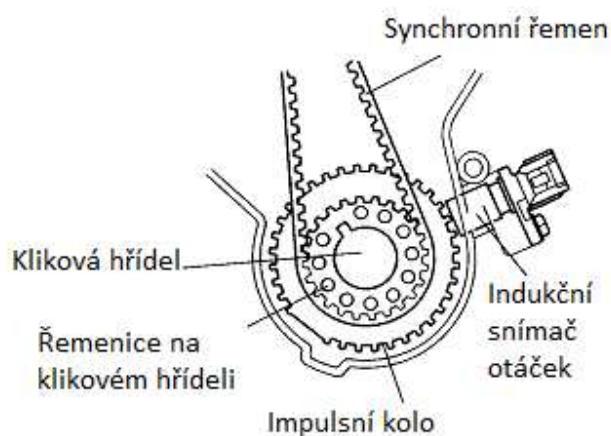
Sinusový signál s velmi rozdílnou amplitudou ze snímače je přiváděn do řídicí jednotky kde je za pomoci vstupních vyhodnocovacích obvodů převeden na pravoúhlý signál s konstantní amplitudou. Tento již pravoúhlý signál může být použit pro přerušovací vstup počítače. Řídicí jednotka podle pozitivních a negativních hran vyhodnocuje úhel natočení klikového hřídele. V případě impulsního kola s 58 osmi zuby a zubovou mezerou je každá pozitivní a negativní hrana počítána jako natočení hřídele o další 3° . Jakmile je rozpoznána zubová mezera, tj. když odstup hran je dvakrát větší než předchozí a následující, řídicí jednotka synchronizuje s tímto natočením určitou přesnou polohu klikového hřídele. Většinou tato poloha odpovídá okamžiku kdy je píst prvního válce v horní úvrati.

Pro zapálení směsi je však potřebná ještě přesnější informace o poloze klikového hřídele než informace s přesností 3° . Proto je čas naměřený mezi dvěma hranami pravoúhlého otáčkového signálu rozdělen na čtyři části. Tímto způsobem potom může být řízení zapálení směsi prováděno s přesností na $0,75^\circ$.

Tento signál je pro elektronické řízení motoru a jeho běh krajně důležitý, při jeho absenci např. z důvodu poruchy samotného snímače otáček klikového hřídele není možný běh motoru.



Obr. 8 Umístění snímače otáček klikového hřídele v motoru



Obr. 9 Další aplikace indukčního snímače otáček na klikovém hřídeli

1.3 Hallový snímač otáček

Pro měření stejnosměrného magnetického pole magnetostatickými snímači jsou používány také galvanomagnetické jevy - Hallův jev a Gaussův jev.

Hallův jev se vyhodnocuje pomocí tenkých polovodičových destiček, kterými protéká elektrický proud a zároveň prochází magnetické pole. Jsou-li proud a magnetická indukce na sebe kolmé, lze příčně ke směru proudu naměřit Hallovo napětí U_H , úměrné velikosti magnetického pole. Zároveň se zvyšuje odpor destičky podle parabolické charakteristiky (Gaussův jev,

magnetorezistor). Příčinou těchto jevů je působení magnetického pole na elektrony, které jsou nositeli elektrického proudu.[3]

Za použití křemíkové technologie a miniaturizace do integrovaného obvodu je možné tento Hallův prvek přímo zkombinovat se zesilovačem výstupního Hallova napětí a vyhodnocovacím obvodem. Vyhodnocovacím obvodem může být například jednoduchý schmittův obvod, který kontroluje překročení určité úrovně prahového napětí naměřeného na Hallově vrstvě pro spínání. Vznikne tak integrovaný Hallův spínač/sonda, která na výstupu poskytuje dvoustavový logický signál. Tento může být již bez dalších úprav vyhodnocován v řídicí jednotce. Při zvyšování otáček roste kmitočet signálu, amplituda se nemění.

Změna stejnosměrného magnetického pole, která je potřebná k měření otáček, může být vytvářena například ozubeným kolem nebo clonkou, které se otáčí zároveň s měřeným objektem. Clonka je zhotovena z feromagnetického materiálu a tím při jejím otáčení dochází k přerušování magnetického obvodu – vzniká tak Hallova závora. V Hallově prvku se tak v závislosti na změně intenzity magnetické indukce vytváří změna Hallova napětí která je potom vyhodnocovacím obvodem převedena na logický otáčkový signál.

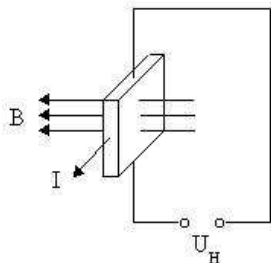
Hallův snímač se nejčastěji vyrábí v provedení se třemi vývody (napájení, výstup, kostra). Výjimkou však nebývají ani snímače dvou vývodové u kterých je otáčkový signál veden napájecím vodičem. Informace je předávána v podobě změny velikosti proudu procházejícího snímačem.

Výhody oproti magnetickým induktivním snímačům otáček:

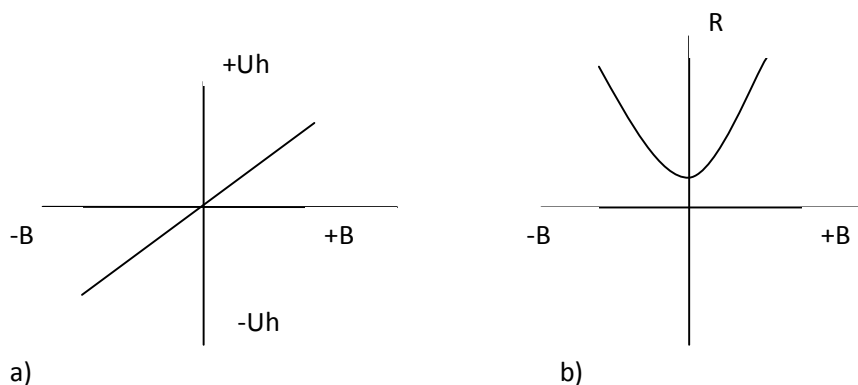
- daleko lépe se hodí pro miniaturizaci a levnější výrobu ve formě integrovaných obvodů, amplituda výstupního napětí není závislá na otáčkách výstupní napětí se dá snadněji dále elektronicky zpracovat, nevyžadují přizpůsobovací obvody,
- velikost výstupního signálu do značné míry nezávisí na velikosti vzduchové mezery mezi rotorem a snímačem,
- malé rozměry.

Nevýhody jednoduchého Hallova snímače jsou:

- značná teplotní závislost způsobená mechanickým pnutím materiálu.
- Kvůli integrované vyhodnocovací křemíkové elektronice nemůže být vystavován příliš vysokým teplotám (max. 155°C)
- Potřebuje napájení, čímž zatěžuje palubní síť vozidla

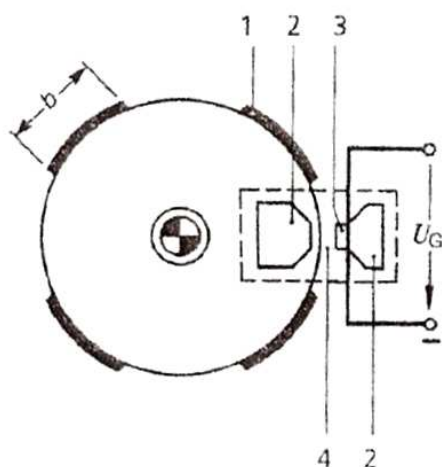


Obr. 10 – Princip Hallova snímače (vektor B měřeného magnetického pole je kolmý na destičku)



Obr. 11

- a) závislost Hallova napětí na intenzitě magnetického pole
b) závislost odporu na intenzitě magnetického pole



1 – Pohyblivá clona

2 – Permanentní magnet

3 – Hallův integrovaný obvod

Obr. 12 - Hallova závora

1.3.1 Snímač otáček vačkového hřídele

Vačkový hřídel ovládá sací a výfukové ventily motoru. Oproti klikovému hřídeli se otáčí poloviční rychlostí. Když se píst ve válci pohybuje do horní úvratě, pak je podle polohy sacích a výfukových ventilů určeno, zda se píst nachází ve fázi komprese nebo výfuku. Z klikového hřídele nelze tuto informaci získat. Je-li zapalování vybaveno mechanickým rozdělovačem poháněným z vačkového hřídele, pak palec rozdělovače vždy ukáže na správný válec a řídicí jednotka nepotřebuje k zapálení směsi informaci o poloze vačkového hřídele.[2]

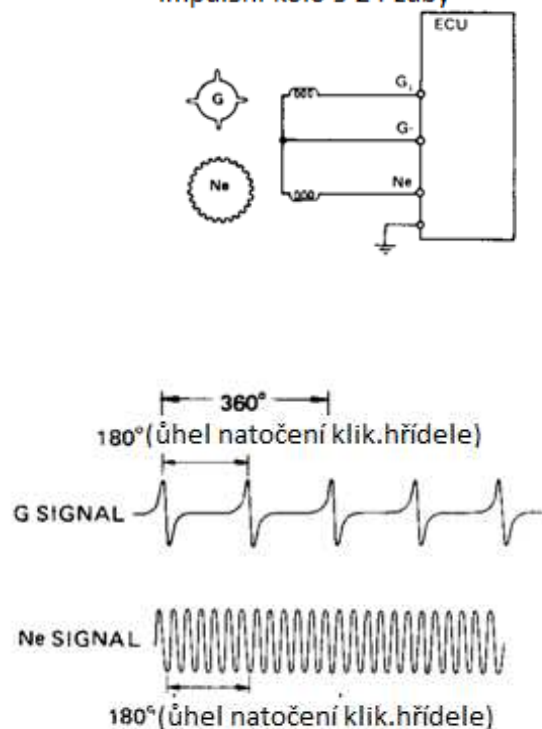
Na rozdíl od těchto systémů zapalování s rotačním rozdělovačem vysokého napětí potřebují systémy Motronic s bezrozdělovačovými zapalovacími systémy a s jednojiskrovými zapalovacími

cívkami přidavné informace. Řídící jednotka totiž musí rozhodnout, kterou zapalovací cívku, s příslušnou zapalovací svíčkou má ovládat. K tomu potřebuje informaci o poloze vačkového hřídele. Tuto informaci potřebuje také u sekvenčního vstřikování paliva pro určení správného okamžiku vstříknutí paliva do příslušného válce. V nejjednodušším případě zjišťuje řídící jednotka zda, při průchodu zubové mezery ozubeného kotouče klikového hřídele, je na snímači vačkového hřídele napětí a tedy zda se 1. válec nachází v pracovní fázi.[2]

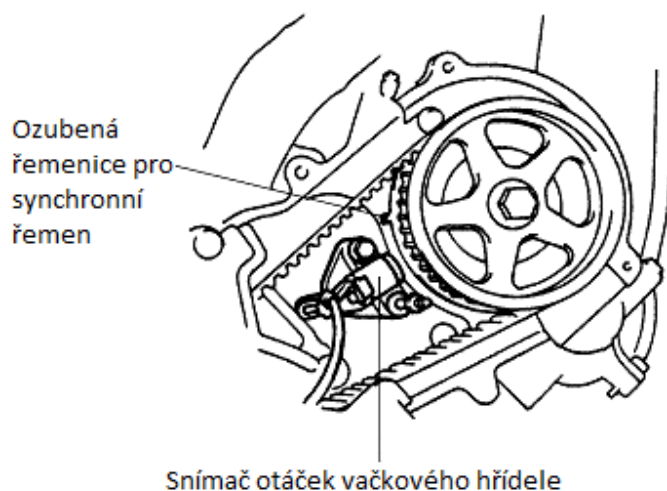
Pro tyto aplikace snímání polohy vačkového hřídele se opět používají nejčastější indukční nebo Hallovy snímače otáček. V případě indukčních snímačů jsou tyto tvořeny kovovým ozubením které se otáčí spolu s vačkovým hřídelem a jsou snímány snímačem umístěným do jejich bezprostřední blízkosti. V případě snímače využívající Hallův princip bývají někdy zuby nahrazeny clonkou která při otáčení přeruší permanentní magnetické pole a na Hallově vrstvě se vytvoří potřebné napětí.

G signal - signál z vačky, impulsní kolo se 4 zuby

Ne signal - signál z klikové hřídele, impulsní kolo s 24 zuby



Obr. 13 – Signály z indukčních snímačů na klikovém a vačkovém hřídeli přiváděné do ŘJ



Obr. 14 – Snímání otáček na zubech ozubené řemenice pro synchronní řemen na vačkovém hřídeli

1.3.2 Diferenciální Hallovy snímače

Dalším možným provedením Hallova snímače jsou integrované dvojité Hallovy snímače, neboli diferenciální uspořádání Hallova snímače.

U těchto snímačů jsou dva kompletní Hallovy systémy umístěné v definované vzdálenosti na jednom čipu a příslušná elektronika (operační zesilovač) vyhodnocuje rozdíl obou Hallových napětí. K dosažení maximálního výstupního signálu odpovídá vzdálenost obou Hallových snímačů (umístěných většinou na okrajích podélného čipu) přibližně polovině rozestupu zubů.[3]

Výhody diferenciálních Hallových snímačů:

- jejich výstupní signál je značně nezávislý na absolutní hodnotě intenzity magnetického pole jelikož diferenciální snímače snímají pouze prostorovou změnu magnetické indukce
- umožňují určení směru otáčení



Obr. 15 - snímání otáček diferenciálním Hallovým snímačem

1.3.3 Snímače otáček kol

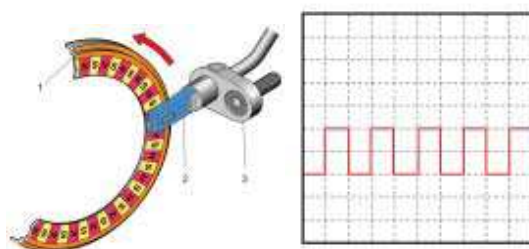
Zařízení pro přesné určení otáček kol se používají především v asistenčních a bezpečnostních systémech jako je ABS, ESP, ASR, ACC. Informace o otáčkách je sdílána z řídicí

jednotky přes sběrnici a je poskytována i ostatním systémům (řízení motoru, řízení převodovky, GPS navigace atp.)

Pro snímání otáček kol se motorových vozidlech v dnešní době využívají především snímače pracující na Hallově (Magnetorezistivním) principu a to pro jejich malou velikost a přesnost. Tyto snímače bývají též v dílenské praxi označovány za „aktivní“ (ke své funkci potřebuje napájecí napětí). Induktivní („pasivní“) snímače se již téměř nepoužívají.

Aktivní Hallův snímač otáček kol je snímač pracující na fyzikálním Hallově principu tak jak je popsán výše. Je napájen definovaným napětím z řídicí jednotky systému ABS. Funkci impulsního kola může obstarávat multipolární kroužek složený z magnetů se střídavým pólováním. Multipolární kroužek bývá zároveň instalován do těsnícího kroužku ložiska kola, tím je docíleno maximální úspory místa. V případě snímání otáček na ocelovém impulsním kole musí být součástí snímače také magnet, který vytváří magnetické pole nezbytné pro vyhodnocení Hallova jevu.

Při otáčení impulsního kola/multipolárního kroužku vyhodnocují prvky Hallových snímačů nebo magnetorezistivní odpory ve spolupráci s integrovanou elektronikou pro spínání snímače, změnu magnetického pole. Tento signál je ve snímači převeden na digitální otáčkový signál který je zpracováván řídicí jednotkou ABS.



Obr. 16 - snímání otáček Hallovou sondou na magnetickém kroužku

Výhody aktivních snímačů (ve srovnání s pasivními snímači):

- Snímání otáček kol z klidového stavu. To umožňuje měření rychlosti až 0,1 km/h, což je důležité u kluzných hnacích systémů (ASR) již v okamžiku rozjezdu.
- Snímače pracující podle Hallova principu identifikují pohyby dopředu a dozadu.
- Konstrukce snímače je menší a lehčí.
- Odpadnutím použití impulsních kol dochází ke zjednodušení kloubového ústrojí k přenosu sil.
- Citlivost vůči elektromagnetickému rušení je nižší.
- Změny vzduchové mezery mezi snímačem a magnetickým kroužkem nemají přímý vliv na signál.[4]

1.4 Snímače úhlu natočení volantu

Většina druhů snímačů úhlu se principiálně hodí i pro snímání úhlu natočení volantu. Vzhledem k tomu, že informace o úhlu natočení volantu, je používána bezpečnostními a asistenčními systémy a má tedy zásadní vliv na jízdu vozu a bezpečnost, je nutné použití snímačů u kterých lze kontrolovat věrohodnost nebo které se pomocí integrované elektroniky kontrolují samy. Nejčastěji se používají magnetické principy (Hallovy spínače), potenciometrické snímače a optoelektrické snímání kódovacího kotouče. Protože běžné snímače jsou schopny měřit maximálně rozsah 360stupňů a volant osobního automobilu má rozsah 1440stupňů (čtyři otáčky), je u většiny snímačů potřeba stálé ukládání nebo registrace otáčky volantu.

1.4.1 Hallův snímač natočení volantu

Hallův snímač úhlu natočení volantu snímá polohu volantu pomocí 14 „Hallových závor“. Používají se v něm Hallovy spínače, na které působí permanentní magnety. Mezi spínači a magnety se pohybuje kovový kódovací kotouč z magneticky měkkého materiálu, který je spojen s hřídelí volantu a který je střídavě odkrývá a zakrývá. Signály ze spínačů vyhodnocuje elektronika. Tímto způsobem se pomocí devíti Hallových IO vytváří digitální informace o úhlu natočení volantu. Zbývajících pět Hallových snímačů registruje otáčku, která je pomocí převodu dopomala s poměrem 4:1 převedena do jednoznačného rozsahu 360stupňů.[3]

1.4.2 Indukčnostní snímač uhlu natočení volantu v servořízení

Pracuje na indukčnostním principu, to znamená, že dochází k rozladění RLC obvodu snímače v závislosti na otáčení rotoru.

Výstupní signál ze snímače je PWM, neboli pulzní šířková modulace, vyhodnocovaný v řídicí jednotce na rychlost otáčení ve stupních za vteřinu. Díky vhodné konstrukci je dosaženo velké přesnosti snímače, kde se rozlišení pohybuje nižší než jedna desetina stupně. V případě, že dojde k přerušení signálu ze snímače, je zachována funkce systému, protože ECU se přepne do nouzového režimu. V nouzovém režimu je řízení tužší a je tudíž narušen komfort řidiče[5]

1.5 Optoelektrické snímače otáček

Tyto snímače mají zdroj viditelného světla nebo polovodičovou diodu, která září v infračervené oblasti. Záření ze zdroje, dopadající na fotodiodu, nebo fototranzistor je přerušováno vhodnou clonou. Na obr. 11 je znázorněn optoelektrický snímač pro elektronické zapalování. Impulzy z tohoto snímače mají konstantní amplitudu, nezávislou na otáčkách.[3]

2 *Návrh laboratorního stanoviště*

Následující část textu se zabývá druhým bodem zadání bakalářské práce, tedy návrhem laboratorního stanoviště pro měření vlastností snímačů otáček a polohy motorových vozidel. Laboratorní stanoviště má sloužit k výuce v hodinách předmětu automobilová elektronika a jemu podobným a bude umístěno v některé z laboratoří katedry elektroniky.

2.1 *Návrh kritérií*

Při návrhu modelu jsem vycházel z předem stanovených podmínek, které by měl model splňovat. Jako hlavní kritéria jsem stanovil:

- Jednoduchá konstrukce vhodná k umístění a provozu v prostorách a učebnách školy
- Měření vlastností snímačů v aplikacích podobajících se skutečnému nasazení v praxi
- Možnost simulace nejčastějších příčin závad při snímání otáček

2.1.2 *Hlavní parametry modelu*

Hlavní parametry kterými navrhnutý model disponuje jsou:

- Simulace měření otáček klikového a vačkového hřídele spalovacího motoru
- Měření indukčním a Halloým snímačem
- Pohon elektromotorem
- Přenos hnací síly a převody řešeny řemeny

2.1.3 *Stručný popis laboratorního stanoviště*

Navrhnuté laboratorní stanoviště simuluje měření otáček klikového a vačkového hřídele spalovacího motoru motorových vozidel. Pro měření příslušných otáček je využito ozubení na setrvačnicku motoru a ozubení řemenice vačkového hřídele. Hlavními částmi, ze kterých se model skládá jsou tedy tyto dvě ozubená kola umístěná na rovnoběžných hřídelích a hliníková konstrukce ke které jsou hřídele připevněny.

Celý mechanismus je roztáčen elektromotorem, který pomocí řemenového převodu přenáší hnací sílu na hřídel se setrvačnickem simulující otáčení klikové hřídele. Dále je stejným způsobem hnací síla přenesena druhý hřídel, který simuluje otáčení vačkového hřídele. Převod mezi těmito hřídeli je přesně $i=2$ (Tedy 2 otáčky klikového hřídele za jednu otáčku vačkového). V přední části je model doplněn deskou, která zakrývá části pohonu a tvoří čelní panel na kterém jsou v bezprostřední blízkosti ozubení kol umístěny samotné snímače. Celé soustrojí je upevněno na rámu sestaveného z hliníkových profilů, které jsou navzájem sešroubovány.

Na modelu se mohou proměřovat vlastnosti veškerých indukčních nebo Halloých snímačů uzpůsobených pro měření otáček na feromagnetickém ozubení. Mezi možné proměřované dynamické vlastnosti snímačů na modelu patří například vliv velikosti vzduchové mezery, obvodového házení ozubení, a otáček na výstupní signál. Výstupní signál snímačů je zobrazován na osciloskopu

Tento navrhovaný model by měl splňovat veškerá výše stanovená kritéria.

2.1.4 Uchycení setrvačníku na hřídeli

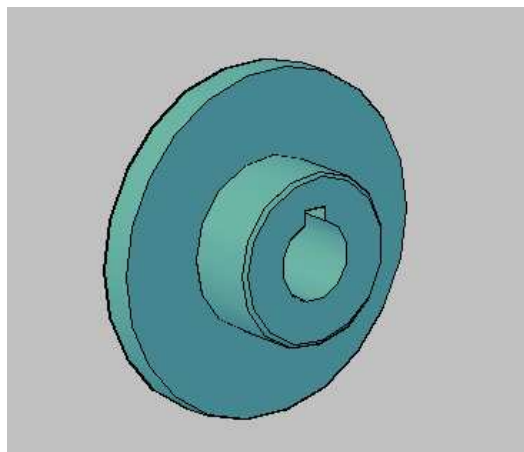
Setrvačnick připevněn na ocelovou hřídel pomocí náboje. Náboj je opatřen kruhovou přírubou, ke které se šesti šrouby přišroubuje setrvačnick. Přenos momentu mezi hřídelem a nábojem je zajištěn pomocí těsného pera a drážky. Náboj je proti sesunutí z hřídele zajištěn šroubem a kruhovým víčkem.

Bylo zvoleno pero o rozměrech 6x6x18mm (pero 6x6x18 těsné DIN 6885A).

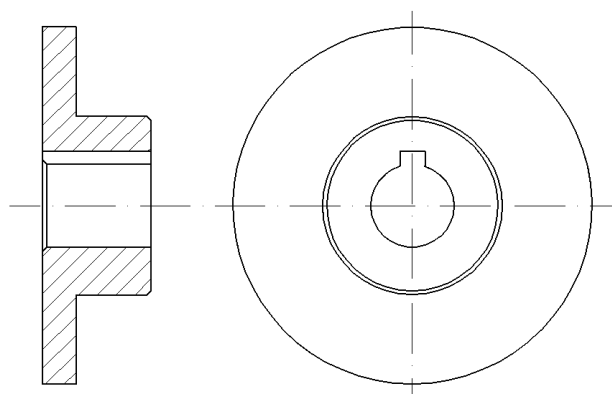
Celkový moment přenositelný pomocí navrženého těsného pera je následovný:

$$M_k = F_2 \left(\frac{d}{2} + \frac{t_1}{2} \right) = 9000 \cdot (0,0125 + 0,012) = \underline{220 Nm}$$

$$F_2 = t_1 \cdot P_d \cdot l' = 0,012 \cdot 125 \cdot 10^6 \cdot 0,006 = 9000 N$$



Obr. 17 - Model náboje pro setrvačnick



Obr. 18 – Nákras náboje pro setrvačnick

2.1.5 Konstrukce uložení hřídele pro setrvačník

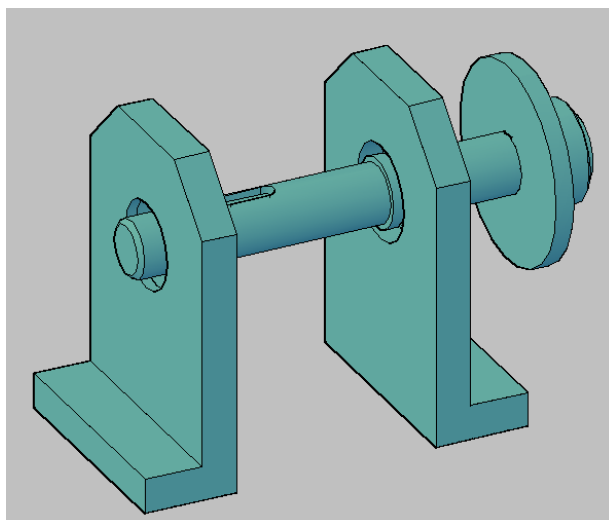
Hřídel setrvačnicku je uložen ve dvou ložiskách. Vnitřní kroužky radiálních ložisek jsou pevně uloženy na hřídeli a jsou v axiálním směru opřeny čelní plochou na jedné straně o nákrážky na hřídeli a na straně druhé o rozpěrnou trubku. Tímto je zajištěno pevné axiální uchycení hřídele. Kroužky ložisek, které se otáčejí vzhledem ke směru působícího zatížení jsou uloženy pevně na hřídeli. Vnější kroužky které se neotáčí a zatížení působí v jednom bodě jsou v podporách uloženy volně. Axiální upevnění ložisek v podporách je zajištěno osazením díry pro ložisko a to vždy z vnější strany. Podpory drží celou hřídel včetně setrvačnicku a jsou pevně přišroubovány k rámu.

Na této hřídeli je dále, kromě setrvačnicku, upevněna klínová řemenice přes kterou je poháněn celý mechanismus a řemenice ozubená, která zajišťuje přenos síly na druhý hřídel.

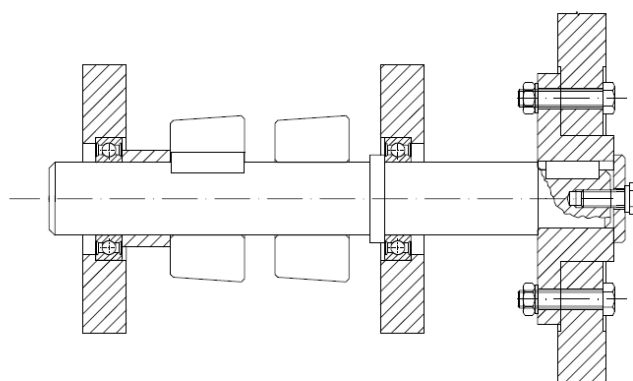
Pro uložení hřídele jsou zvoleny jednořadá kuličková ložiska s těsněním na obou stranách. Vnitřní průměr ložisek je, tak jako průměr hřídele, 25mm.

Zvolená ložiska: Kuličková ložiska, jednořadá, těsnění na obou stranách 61905-2RS1

$d=25$ $D=42$ $B=9$ Mezní otáčky: 10000ot/min



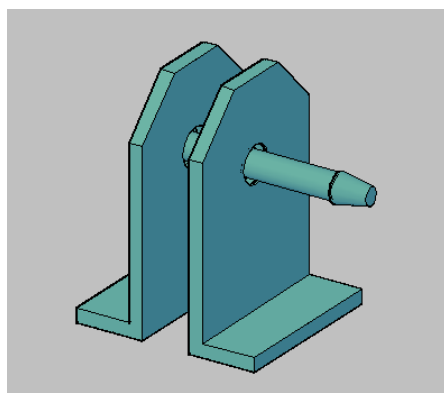
Obr. 19 – Model sestavy hřídele pro setrvačník



Obr. 20 – Náčrtek sestavy hřídele pro setrvačník

2.1.6 Uložení hřídele pro řemenici vačky

Tak, jako hřídel setrvačníku, je i hřídel druhého ozubeného kola (řemenice), na které budou také měřeny otáčky, podobně uložena na dvou ložiskách. Měřená ozubená řemenice je zde na konec hřídele upevněna kuželovým čepu. Řemenice s kuželovou dírou se natahuje na čep hřídele pomocí utažení matice. Pevný spoj je dán přesnou shodou kuželového otvoru v řemenici a čepu na konci hřídele. Pevné axiální uchycení hřídele je zde zajištěno rozpěrnými trubkami, které jsou opřeny o ložiska na obou stranách. Tato hřídel je poháněna z hřídele setrvačníku pomocí synchronního řemenu a ozubené řemenice. Podpory s ložisky jsou opět pevně přišroubovány k rámu. Poloha podpor vůči rámu se však dá měnit a tím je také možné dostatečně předeprnout řemen.



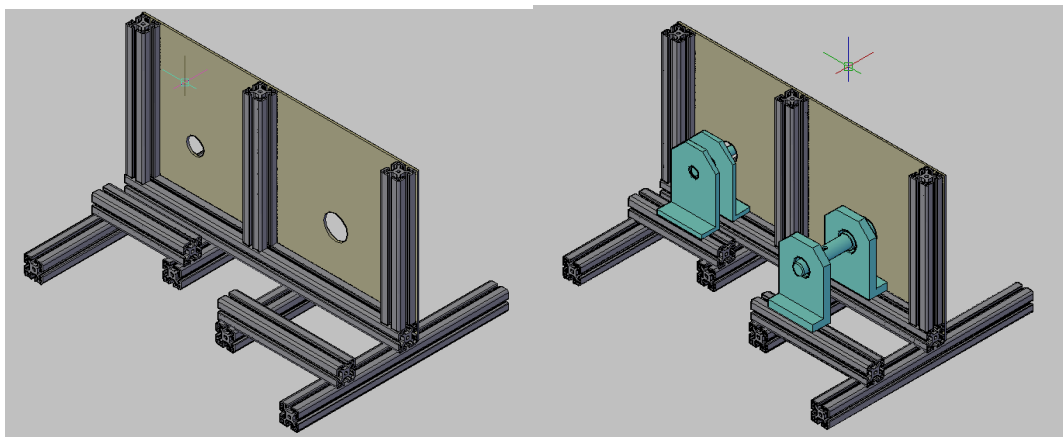
Obr. 21 – Model sestavy hřídele pro řemenici vačky

2.1.7 Rám

Hlavní rám je sestaven z hliníkových profilů. Profily jsou tvarované tak aby bylo možné je dobře a pevně sešroubovat k sobě. Také se zde počítá s možností připevnit tento rám pevně ke stolu či jiné konstrukci aby se zamezilo případným vibracím od rotujícího setrvačníku a také pro větší stabilitu z důvodu velké setrvačné hmotnosti setrvačníku. Kolmé spoje profilu, kdy je čelo profilu přišroubováno ke straně druhého, jsou realizovány pomocí speciálních spojek. Tyto spojky pasují do tvaru profilu. V druhém profilu je vyřezán závit, do kterého se zašroubuje šroub spojky. Tímto vznikne pevný kolmý spoj.

Profily jsou k sobě spojovány také stranami. Do jednoho profilu je zasunut šroub a do druhého matka s podložkou. Skrze vyvrtanou díru pro vsunutí šroubováku je možné potom šroub dotáhnout a takto vytvořit spoj. Při navrhování tvaru rámu, byl kladen důraz na stabilitu celé konstrukce. Toho je docíleno poměrně velkou podstavou (600mmx460mm), která tak zajistí jak podélnou tak příčnou stabilitu.

Celkově je na výrobu navrhnutého rámu potřeba zhruba 3,2m hliníkových profilů.



Obr. 22 – Model hliníkového rámu a uchycení podpor s hřídelemi

2.1.8 Hnací mechanismus

Navrhnutý hnací mechanismus se skládá ze čtyř řemenic a dvou řemenů. První klínový řemen zajišťuje přenos hnací síly od elektromotoru na hnanou hřídel setrvačníku. Tento přenos je z převodován dopomala v poměru 2:1. Převod dopomala je zvolen kvůli redukci velkého setrvačného momentu setrvačníku a tedy potřebného hnacího momentu na hřídel elektromotoru při roztáčení. Jako řemen byl zvolen klínový řemen klasického průřezu o velikosti Z. Klínový řemen není tak ohebný, ale díky klínu má větší přilnavost k řemenicím a přenesení tím větší zatížení.

Některé z hlavních parametrů navrhnutého převodu s klínovým řemenem:

Průměr první řemenice $D_1=50\text{mm}$

Průměr druhé řemenice $D_2=100\text{mm}$

Osová vzdálenost $A=250,94\text{mm}$

Koeficient prokluzu řemene 1,216%

Úhel opásání první řemenice $B_1: 168,56$

Úhel opásání druhé řemenice $B_1: 191,44$

Délka řemene 740mm

Rychlost řemene při 2000ot/min $v=5,35\text{m/s}$ (maximální dovolená rychlost pro daný typ $v=30\text{m/s}$)

Výkon přenesitelný řemenem $P=0,58\text{kW}$

Konkrétní označení zvolených dílů:

Řemen: PHG Z28.5

Řemenice 1: PHP 1SPZ50TB

Řemenice 2: PHP 1SPZ100TB

Přenos síly mezi samotnými hřídelemi je realizován synchronním řemenem. Synchronní řemen zajistí konstantní převodový poměr bez nežádoucího skluzu. Jelikož tyto hřídele simulují na modelu otáčení klikového a vačkového hřídele je mezi nimi převodový poměr přesně 2:1. (Tedy 2 otáčky klikového hřídele za jednu otáčku vačkového). Ozubený řemen má ze všech řemenů nejlepší vlastnosti. Je ohebný, dovoluje použít malé průměry řemenic, přenáší největší výkony a největší

obvodové rychlosti, nevyžaduje velké předpětí, pracuje bez skluzu s účinností s téměř 100% účinností a tím umožňuje synchronní pohyb poháněným řemenicím.

Některé z hlavních parametrů navrhnutého převodu se synchronním řemenem:

Počet zubů první řemenice $z_1=18$

Roztečný průměr první řemenice $D_p=54,57\text{mm}$

Počet zubů druhé řemenice $Z_2=36$

Roztečný průměr druhé řemenice $D_p=109,15\text{mm}$

Osová vzdálenost $A=308,36$

Úhel opásání první řemenice $B_1: 169,85$

Úhel opásání druhé řemenice $B_1: 190,15$

Počet zubů řemene $z=92$

Rychlost řemene při 2000ot/min $v=5,35\text{m/s}$ (maximální dovolená rychlost pro daný typ $v=30\text{m/s}$)

Výkon přenositelný řemenem $P=1.35\text{kW}$

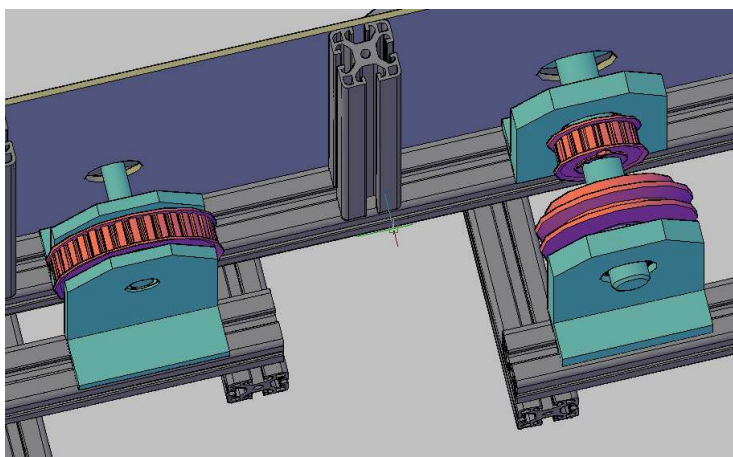
Konkrétní označení zvolených dílů:

Řemen: PHG 345-L-100

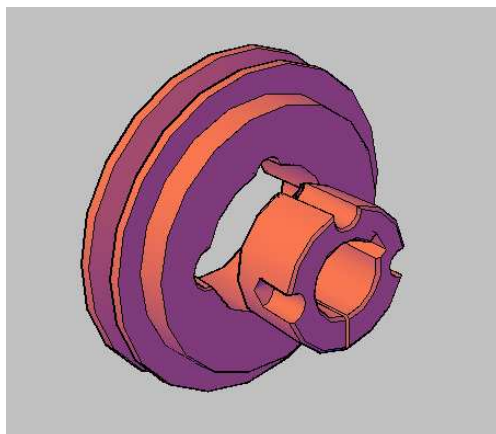
Řemenice 1: PHP 18L100TB

Řemenice 2: PHP 36L100TB

Pro realizaci těchto řemenových převodů jsou zvoleny výrobky firmy SKF. Při volbě konkrétních řemenic ze sortimentu bylo využito jejich internetové aplikace pro návrh řemenových převodů. Pevné spojení řemenic s hřídelemi a přenos momentu z řemenice na hřídel, je zajištěn pomocí kuželových samosvorných pouzder, které po natažení řemenice vytvoří svěrné spojení sevření na válcové ploše. Vnitřní průměr těchto pouzder musí přesně odpovídat průměru hřídele. Toto svěrné spojení v našem konkrétním případě přeneše na hřídel setrvačnicku třením moment až 145Nm. V případě doplnění tohoto spojení pomocí kuželového samosvorného pouzdra o spojovací hřídelové pero je přenositelný moment ještě mnohem vyšší.



Obr. 23 – 3D model řemenic na hřídelích



Obr. 24 – Zajištění řemenic pomocí kuželových pouzder

2.1.9 Elektromotor

Pro pohánění celého mechanismu je zvolen patkový nízkonapěťový trojfázový asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko typové řady 1LA od firmy Siemens. Asynchronní motory jsou díky své konstrukční jednoduchosti dnes nejužívanějšími motory. Trojfázový asynchronní motor 1LA7 je určen k pohonu průmyslových zařízení, např. ventilátorů, čerpadel, obráběcích strojů, lisů apod., lze jej používat pro prostředí mírného klimatu.

Výstupní hřídel elektromotoru je opatřena řemenicí pro klínový řemen. Elektromotor je pomocí jeho patkové konstrukce připevněn k hliníkovému rámu. Uchycení šrouby do hliníkových profilů s možností posunutí umožňuje následné napnutí řemenu.

Podle průměru výstupní hřídele elektromotoru je potřeba přesně dimenzovat samosvorné pouzdro pro spojení řemenice a hřídele.

Model lze však doplnit o jakýkoli jiný druh elektromotoru který, je vhodný pro takovouto aplikaci. Z toho důvodu taky není v předchozím návrhu detailně řešeno jeho uchycení, jelikož do poslední chvíle nebyl znám konkrétní typ instalovaného elektromotoru.

Některé z hlavních parametrů zvoleného elektromotoru:

Typ: 1LA7073 -4AB10

Osová výška: 71mm

Výkon: 0,37kW

Jmenovité otáčky: 1500ot/min

Hmotnost: 6kg

Pro jmenovitá napětí : 230V / 400V, 50 Hz nebo 460V, 60 Hz

Pro trvalé zatížení typu S1

Vlastní povrchové chlazení IC411 dle ČSN EN 60034-6

Izolační systém teplotní třídy izolace F s oteplením ve třídě B

Krytí IP55

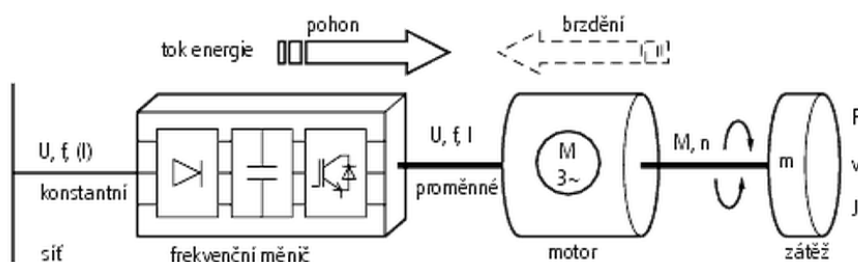
Hliníková kostra se svorkovnicí nahoře

4pól



Obr. 25 – Elektromotor 1LA7

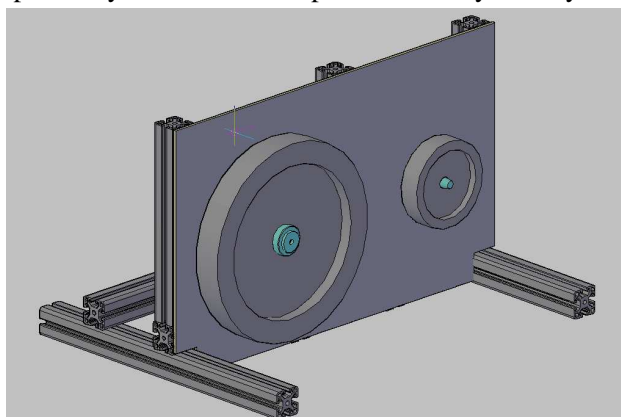
Plynulá regulace otáček použitého asynchronního je zajištěna frekvenčním měničem. Frekvenční měnič konvertuje jednofázový nebo třífázový napájecí zdroj s konstantním napětím a frekvencí na nový třífázový zdroj napětí, jehož napětí a frekvence jsou proměnné. Toto řízení napětí/frekvence umožňuje plynulé řízení rychlosti třífázových motorů. Pro naši aplikaci je využito plynulé řízení otáček motoru frekvenčním měničem, zejména v oblasti nízkých otáček při rozběhu mechanismu kde zajistí překonání velkého setrvačného momentu setrvačníku a jeho bezproblémové roztočení.



Obr. 26 – Schéma elektrického pohonu s frekvenčním měničem

2.1.10 Čelní panel

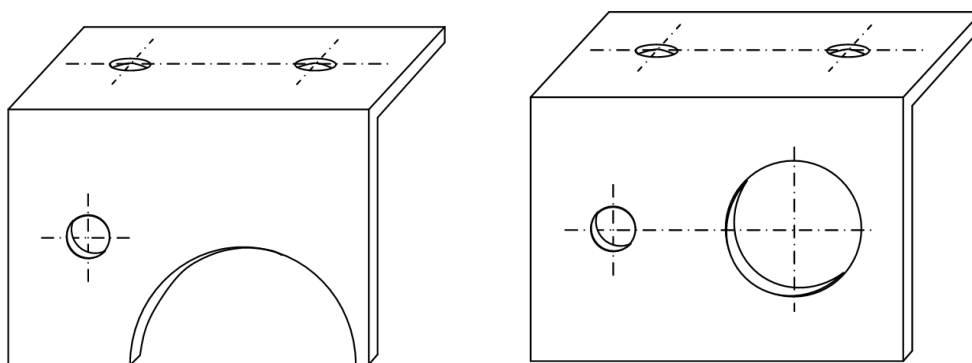
Navrhnutý čelní panel je zhotoven z materiálu tloušťky 4mm. Je umístěn bezprostředně za měřenými ozubenými koly a zakrývá hnací části mechanismu jako řemenice, řemeny a hřídele. Je přichycen šesti šrouby k podporám z hliníkových profilů. Na takto zhotovený čelní panel budou v blízkosti ozubení kol přidělány snímače otáček pomocí kovových úchytů.



Obr. 27 – Pohled na čelní panel s měřenými ozubenými koly

2.1.11 Uchycení snímačů

Snímače jsou přidělány na čelní panel pomocí nerezových plechů profilu L. Do těchto plechů jsou vyřezány kruhové díry do kterých snímač přesně pasuje a tím je stanovena neměnná poloha snímače nad ozubením. Snímač je dále také pevně přichycen k nerezovému plechu šroubem a matkou. Velikost vzduchové mezery se však dá měnit vložením příslušné podložky či více podložek mezi snímač a plechový úchyt snímače. Pro zamezení přenášení vibrací do rámu, vznikajících od magnetických částí v indukčním snímači při snímání rotujícího ozubení kola, je spojení mezi úchytem a čelním panelem opatřeno tlumící vrstvou z tenké gumy proti zamezení případné rezonance.



Obr. 28 – Konzoly pro uchycení snímačů k čelnímu panelu

2.1.12 Použité snímače

Indukční snímač polohy klikového hřídele

Tento snímač je určen pro bezdotykové snímání otáček rotujícího feromagnetického ozubení. Je to elektromagnetický generátorový snímač využívající fyzikálního principu elektromagnetické indukce. Určen pro snímání polohy klikového hřídele. Výstupem je sinusový signál s proměnnou amplitudou.

Označení: 047 906 433

Doporučená vzduchová mezera mezi ozubením a snímačem: 1mm

Pracovní teplota -40°C až 125°C

Rozmění snímáných otáček: 60 až 8000ot/min

Výstupní napětí: minimálně 0,2V

Konektor: bayonet Schlemmer 2 vývody 10 SL 7814050



Obr. 29 – Indukční snímač otáček klikového hřídele 047 906 433 (ostatní jsou velmi podobné)

Hallův snímač polohy vačkového hřídele

Tento snímač je také určen pro bezdotykové snímání otáček rotujícího feromagnetického ozubení nebo značky. Pracuje na fyzikálním principu Hallova jevu. Ke své činnosti potřebuje konstantní napájecí napětí. Výstupní signál z Hallova snímače je v podobě obdélníkových napěťových impulsů. Jeho konektor má 3 piny (napájení, zem, výstupní signál). Je určen ke snímání polohy vačkového hřídele.

Označení: 03D 907 603

Napájecí napětí: 5V

Rozsah výstupního napětí: 0V nebo 5V

Konektor: 3 vývody (pin č.1-napájení, pin č.2-signál, pin č.3-zem)

Hallův snímač ujetých kilometrů

Tento snímač je podobný předchozímu Hallovu snímači vačkového hřídele. Ve voze je určen ke snímání otáček na ozubení, ze kterého lze ujetou vzdálenost odvodit (skříň diferenciálu, převodovka, atp.). Tento snímač je napájen oproti předchozímu konstantním napětím 12V místo 5V a tedy i jeho výstupní signál je v rozmezí 0V nebo 12V.

Označení: 6QD 919 149A

Napájecí napětí: 12V

Rozsah výstupního napětí: 0V nebo 12V

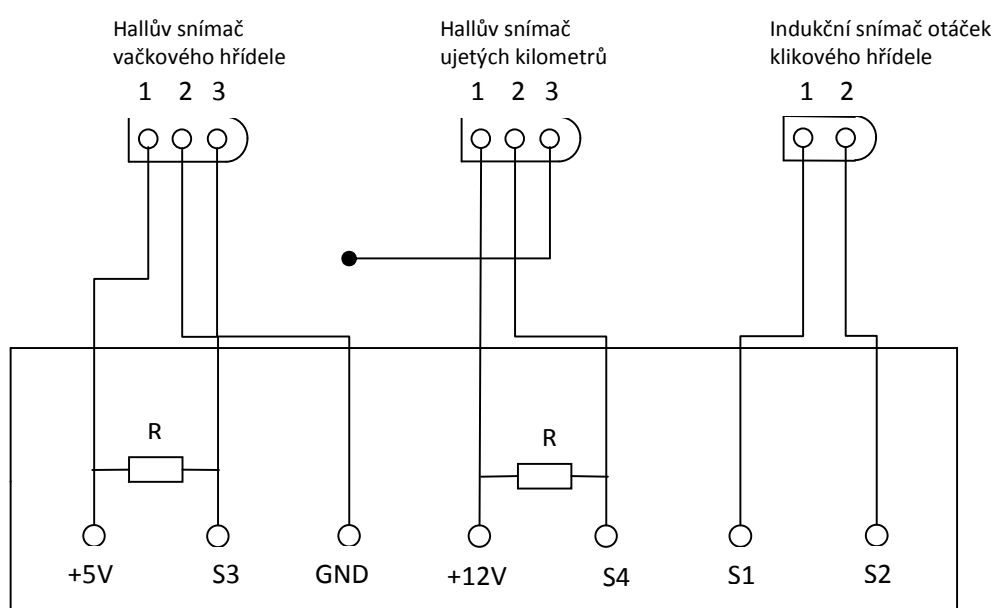
Konektor: 3 vývody(pin č.1-napájení, pin č.2-signál, pin č.3-zem)

Tyto proměřované snímače jsou na modelu opatřeny patřičnými konektory z kabelového svazku automobilu. Všechny vývody včetně napájení a zemnění snímačů jsou vyvedeny do malé krabice se svorkovnicí pro snadnější a přehlednější měření. V krabici jsou také zapojeny zatěžovací rezistory pro měření na Hallových snímačích. Tato svorkovnice je malá plastová krabice s několika zdířkami pro konektory. Vodiče od konektorů snímačů jsou přivedeny spodní stranou.

Schéma

zapojení

svorkovnice:



Obr. 30 – Schéma zapojení svorkovnice

+5V ... napájení Hallova snímače otáček vačky +5V

S3 ... výstupní signál snímače otáček vačky

GND ... zem

+12V ... napájení Hallova snímače ujetých km +12V

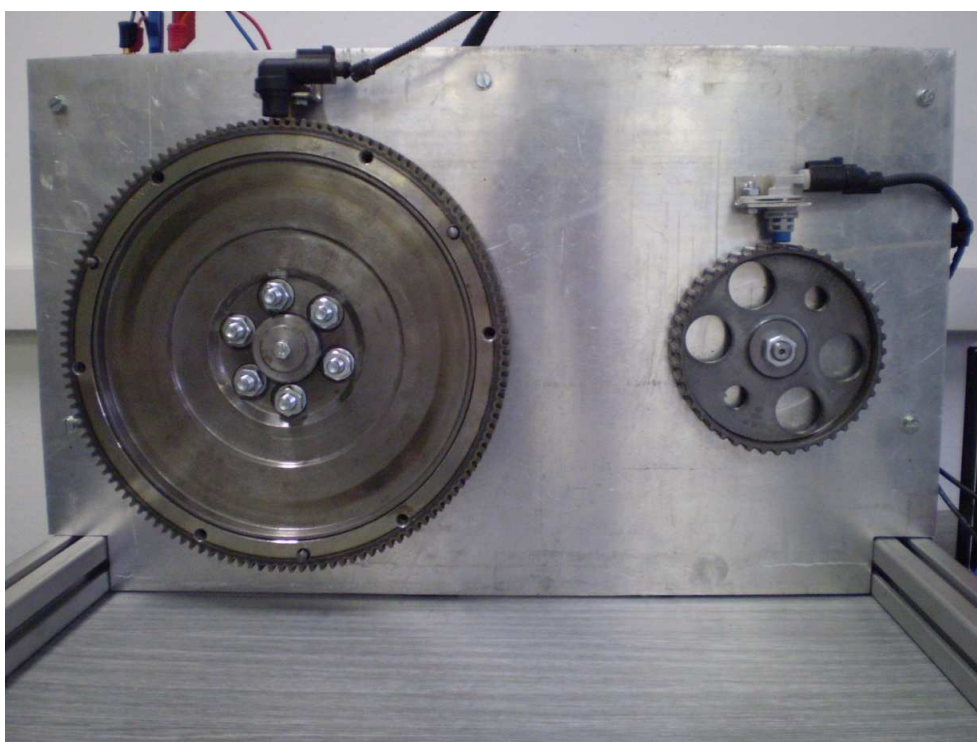
S4 ...výstupní signál Hallova snímače ujetých

S1,S2 ... signální vodiče indukčního snímače polohy klikového hřídele

R=1kΩ

2.2 Realizace

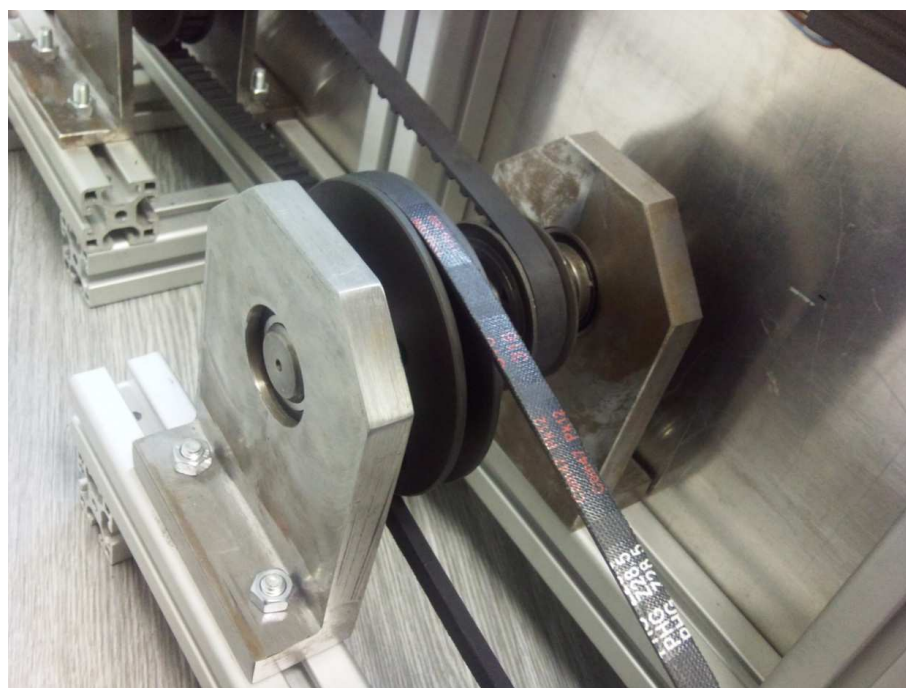
Realizace modelu podle předchozího návrhu proběhla víceméně úspěšně. Všechny mechanické díly byly zadány k výrobě v profesionální dílně podle výrobních výkresů, které jsou v příloze. Součásti hnacího mechanismu od firmy SKF byly objednány u distributora podle seznamu součástí, který je také v příloze. Hliníkový rám byl nařezán a sešroubován z profilů které byly již k dispozici ve škole. Čelní panel byl vyřezán z hliníkového plechu tloušťky 4mm. Ložiska na hřídele byly nalisovány pomocí svěráku a použití hrubé síly. Téměř ke všem manuálním úkonům bylo využito menší řemeslné dílny v budově školy. Samotná kompletace jednotlivých prvků do funkčního celku poté už nečinila žádné větší komplikace. Výsledná realizace modelu je zdokumentována na následujících fotografiích.



Obr. 31 – Pohled na čelní panel



Obr. 32 – Pohled na zadní část modelu – hnací mechanismus



Obr. 33 – Pohled na uložení hřídele setrvačníku

Výrobní výkresy jednotlivých dílů a seznam objednaných součástí pohonu jsou v příloze.

3 *Ověření funkčnosti*

Jakmile byl model zkompletován a bylo možné s mechanismem točit, proběhlo ověření funkčnosti za přítomnosti vedoucího bakalářské práce.

Jako první byla ověřena mechanická stránka modelu. Po mechanické stránce model nevykazuje žádné problémy. Otáčení setrvačníku a druhého ozubeného kola pro měření otáček je plynulé, bez jakýchkoli doprovázejících zvuků atp. Uložení hřídelů, řemenic a ozubených kol nemá vůli v žádném směru. Celá konstrukce, položená na stole, je dostatečně stabilní a rám pevný. Nehrozí tedy její překocení vlivem velké hmotnosti setrvačníku atp. Řemeny zůstávají stále dostatečně předeprnuté.

Jako další byla ověřena funkčnost snímačů a možnost měření jejich vlastností na sestaveném modelu. Všechny snímače byly úspěšně zprovozněny a proměřeny. Jejich výstupní signály odpovídají správné funkci snímačů. Určení příslušných otáček je tedy z výstupních signálů možné. Možnost změny velikosti vzduchové mezery mezi snímačem a ozubením pomocí podložek a sledování vlivu této změny na výstupní signály snímačů (dynamické měření) sejevilo také jako vhodné. Výměnou a kombinací různě silných podložek lze jednoduše nastavit kolem 10ti hodnot velikostí vzduchové mezery.

Z výstupního signálu induktivního snímače na setrvačníku, bylo dále usouzeno na jemné obvodové házení setrvačníku, které bylo předtím okem téměř nepostřehnutelné. Tohoto faktu lze však vhodně využít do laboratorní úlohy.



Obr. 34 – Pohled na měření na laboratorním stanovišti

3.1 Typizovaná laboratorní úloha

V laboratorní úloze je kladen důraz především na měření za použití sestrojeného modelu. Zadáni typizované laboratorní úlohy bylo sestaveno podle pokynů vedoucího bakalářské práce. Laboratorní úloha obsahuje následující body:

- Hlavička
- Zadání
- Teoretický úvod
- Schéma zapojení

Student se při měření předložené úlohy podle bodů zadání postupně seznámí se základními vlastnostmi a konstrukcí snímačů otáček a polohy používaných v automobilovém průmyslu. Osvojí si postup měření jejich výstupních signálů a dokáže vyhodnotit jejich správnou funkci. Mezi hlavní body zadání patří proměření statických a proměření dynamických vlastností snímačů.

Naskýtají se zde i možnosti doplnění laboratorní úlohy o další body zadání jako například měření na vadném snímači, sledování vlivu chybějícího či křivého zubu ozubení na výstupní signál nebo měření vzájemného úhlu natočení klikové a vačkové hřídele.

Kompletní typizovaná laboratorní úloha je v příloze.

4 *Vzorový protokol*

Vzorový protokol je vypracovaný v následujících bodech podle základních zásad pro vypracování protokolu o měření:

- hlavička
- zadání měřené úlohy
- teoretický rozbor
- schéma zapojení
- použité přístroje a pomůcky
- postup měření
- vlastní vypracování
- závěr

Protokol co nejsrozumitelněji vysvětluje cíle měření, představuje postup a průběh měření a ve své finální části shrnuje a objasňuje výsledky a z nich plynoucí závěry měření.

Kompletní vypracovaný protokol z měření je v příloze.

Závěr:

V první kapitole bakalářské práce byly popsány nejčastěji používané snímače otáček a polohy, jejich fyzikální principy a konstrukční řešení. Tato kapitola je důležitá pro pochopení základních vlastností snímačů otáček. Byly zde popsány především snímače otáček indukční a Hallovy. Teoretické poznatky získané z této části jsem využil pro vypracování dalších částí bakalářské práce.

Další kapitolou byl návrh a realizace laboratorního stanoviště pro měření vlastností snímačů otáček v předmětu automobilová elektronika. Návrh modelu vycházel z předem stanovených požadavků. Těmto požadavkům jsem se snažil co nejvíce vyhovět. Jsou zde podrobně popsány jednotlivé navrhnuté části modelu. Tato kapitola se zabývá spíše problematikou z oblasti strojnictví nežli elektroniky. Samotná realizace modelu pak taktéž proběhla úspěšně, což je zdokumentováno na fotografiích. Bez této realizace by nebylo možné přistoupit k dalším bodům zadání.

Splněním třetího bodu zadání byla ověřena funkčnost laboratorního stanoviště a také navržena typizovaná laboratorní úloha. Zadání úlohy klade důraz především na možnost názorné demonstrace základních vlastností snímačů otáček využitím sestaveného modelu.

Pro úplnost byl vypracován vzorový protokol podle bodů zadání laboratorní úlohy.

Hlavní přínos této bakalářské práce vidím ve vytvoření funkčního měřicího stanoviště. Smysl a úspěšnost této bakalářské práce se potvrdí tehdy, zda-li se opravdu najde využití sestaveného modelu při školní výuce.

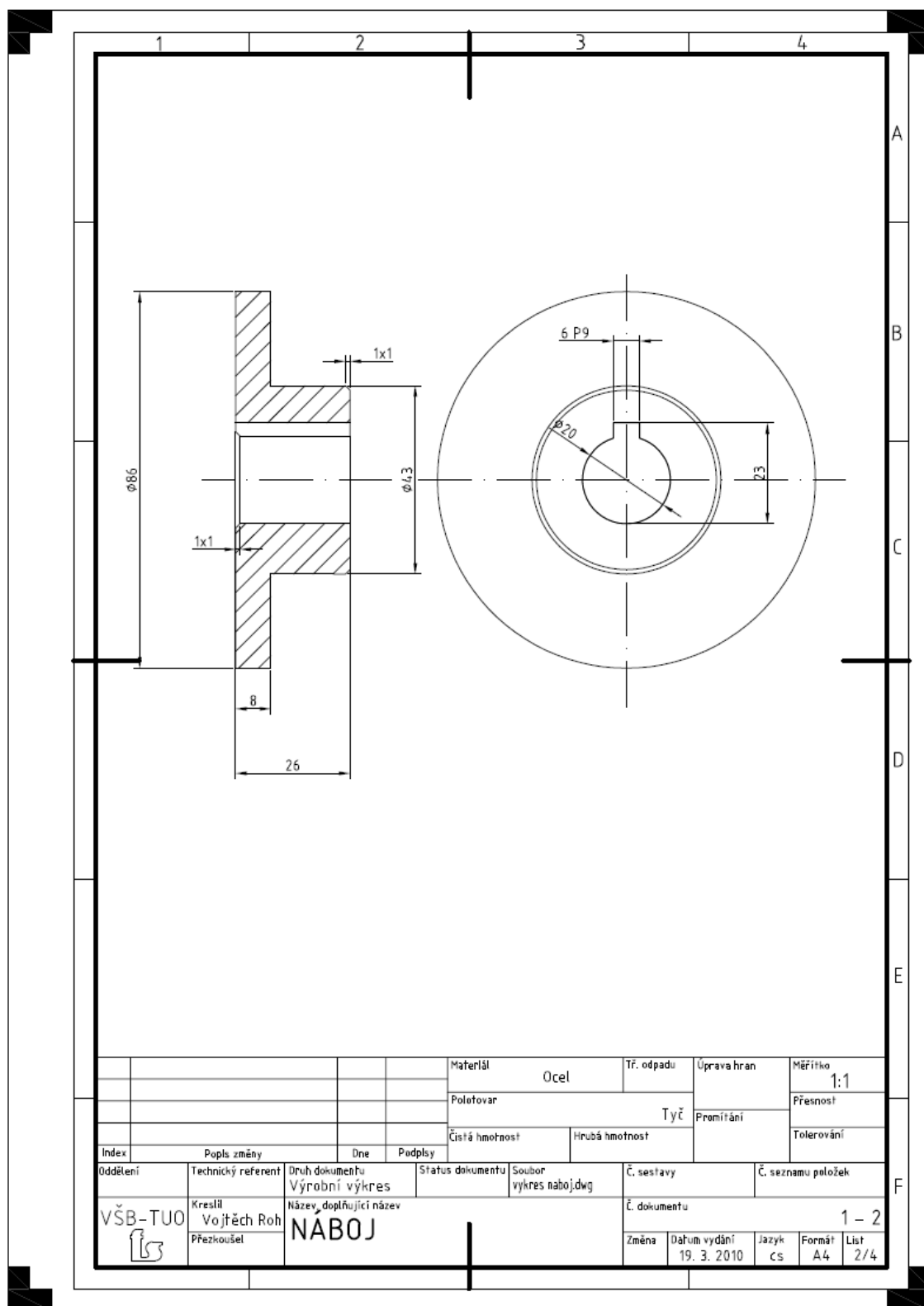
Použitá literatura:

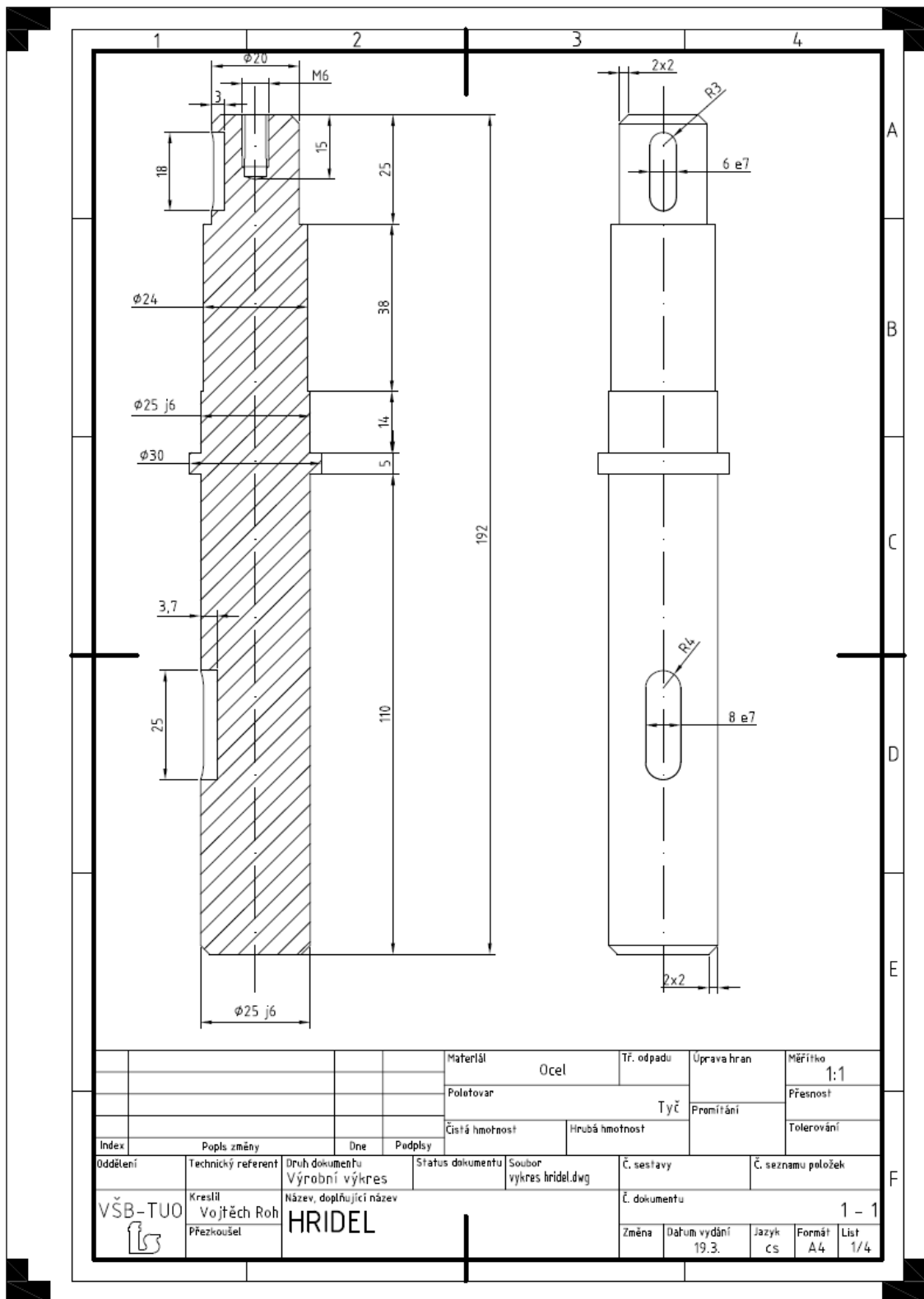
- [1] Vlček, J - *Snímače v motorových vozidlech - Doplnkový text k publikaci Jednoduchá elektronika pro obor Autoelektrikář, Autotronik, Automechanik*. Dostupné z WWW:
<http://www.tzb-info.cz/download.py?file=docu/texty/0001/000102_cidla_snimace.pdf>
- [2] Vlk, F. *Automobilová elektronika 3 - Systémy řízení motoru a převodů*. Brno, [s.n.], 2006.
- [3] Čidla, snímače, ovládací prvky. Přednášky předmětu automobilová elektrotechnika. . VŠB – Technická Univerzita Ostrava 2010 Dostupné z WWW:
<http://fei1.vsb.cz/kat430/data/ae/Cidla_snimace_ovladaci%20prvky.pdf>
- [4] *Snímače otáček kol v motorovém vozidle - Funkce, diagnóza, vyhledávání závad*. Dostupné z WWW: <http://hella-online.code-x.de/uploads/anhaenge/94_14/B_Wheelspeed_2009_CZ.pdf>
- [5] Mrověk, T, *Labolatorní model servořízení*. Bakalářská Práce. VŠB – Technická Univerzita Ostrava 2010

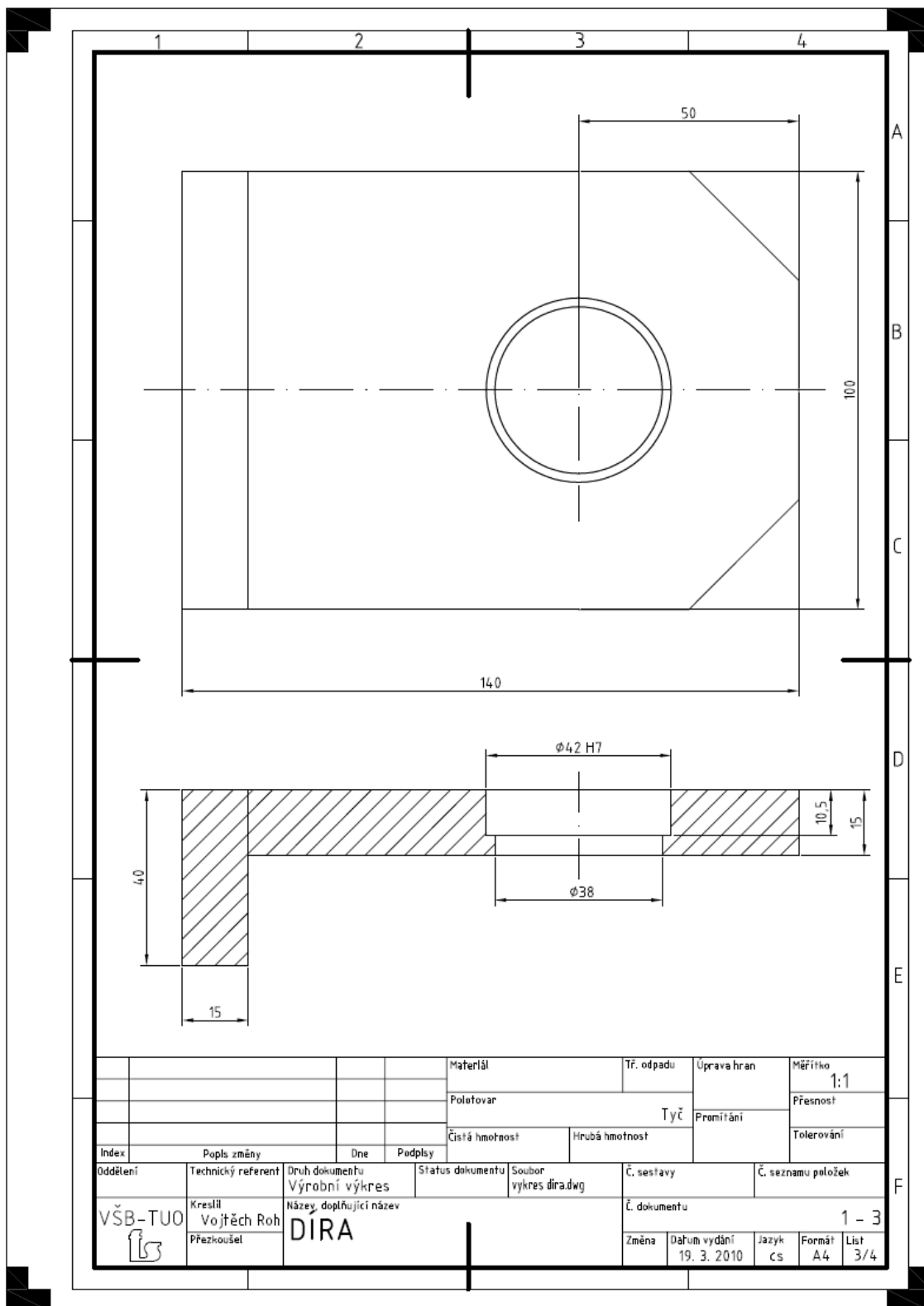
Přílohy

Seznam příloh:

- 1) Výrobní výkresy
- 2) Seznam objednaných součástí
- 3) Typizovaná laboratorní úloha
- 4) Vzorový protokol







1		2		3		4		A B C D E F									
				Materiál		Tř. odpadu		Úprava hran									
				Početovar				Přesnost									
				Čistá hmotnost		Hrubá hmotnost		Tolerování									
Index	Popis změny		Dne	Podpisy													
Oddělení	Technický referent		Druh dokumentu	Status dokumentu	Soubor		Č. sestavy		Č. seznamu položek								
VŠB-TUO	Kreslil Vojtěch Roh		Výrobní výkres		vykres krouzky.dwg												
	Přezkoušel		Název, doplňující název			Č. dokumentu		1 - 4									
		KROUZKY				Změna	Datum vydání	Jazyk	Formát								
							19. 3. 2010	cs	A4								
									List								
									4/4								

Seznam objednaných součástí

Název	Objednací číslo SKF	Počet kusů
Kuličkové ložisko, jednořadé, těsnění na obou stranách	61802-2RS1	2x
Kuličkové ložisko, jednořadé, těsnění na obou stranách	61905-2RS1	2x
Standardní řemenice pro ozubené řemeny s kuželovým pouzdrem L050	PHP 18L050TB	1x
Standardní řemenice pro ozubené řemeny s kuželovým pouzdrem L050	PHP 36L050TB	1x
Synchronní řemen L	PHG 345-L-050	1x
Řemenice pro klínové řemeny s úzkým průřezem a kuželovým pouzdrem 1 drážka SPZ	PHP 1SPZ100TB	1x
Řemenice pro klínové řemeny s úzkým průřezem a kuželovým pouzdrem 1 drážka SPZ	PHP 1SPZ50TB	1x
Klasický klínový řemen 10/Z	PHG Z28.5	1x
Metrické pouzdro	PHF TB1108X15MM	1x
Metrické pouzdro	PHF TB1108X25MM	1x
Metrické pouzdro	PHF TB1210X25MM	1x
Metrické pouzdro	PHF TB1008X14MM	1x

VŠB-TU Ostrava	AUTOMOBILOVÁ ELEKTRONIKA		Fakulta elektrotechniky a informatiky
<i>Datum měření:</i>	1.	Snímače otáček a polohy	<i>Jména, studijní skupiny:</i>
<i>Hodnocení:</i>			

Zadání:

- Na předloženém přípravku pro ověřování vlastností snímačů otáček a polohy, ověřte statické a dynamické vlastnosti vybraných typů snímačů.
- Statické vlastnosti
 - Měřením zjistíte vnitřní odpor následujících snímačů:
 - snímač polohy klikového hřídele 047 906 433
 - snímač polohy vačkového hřídele 03D 907 603
 - snímač polohy ujeté vzdálenosti 6QD 919 149A
 - Vyjádřete se k technologickému provedení snímačů(indukční Hallův)
- Dynamické vlastnosti
 - S využitím osciloskopu analyzujte výstupní signály výše uvedených tří typů snímačů
 - Změřte převodní charakteristiku snímače polohy klikového hřídele(047 906 433)
 $U_{\max} = f(d)$
 U_{\max} ... špičkové napětí(u harmonického průběhu se vyskytuje v $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ periody) [V]
 d ... velikost vzduchové mezery [mm]
 - Změřte vliv velikosti vzduchové mezery na výstupní signál snímače polohy vačkového hřídele(03D 907 603)
 - Změřte vliv velikosti vzduchové mezery na výstupní signál snímače ujeté vzdálenosti(6QD 919 149A)

Bezpečnostní opatření:

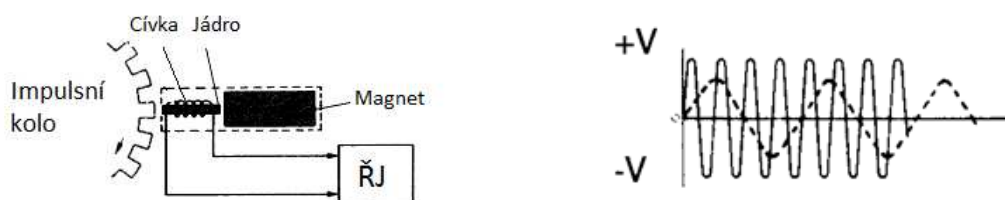
Veškeré přístroje musí být zapojeny a připraveny k měření před roztočením modelu.

Teoretický úvod:

Indukční snímače otáček

Skládají se obecně ze tří hlavních magnetických součástí: nehybná cívka, část magneticky měkkého železa, trvale magnetická část.

Změna magnetického toku potřebná k vytváření výstupního napětí je způsobována otáčením ozubeného kola. V cívce, která je pevně spojená s permanentním magnetem, se indukují změnou magnetického toku střídavé napětí přibližně sinusového průběhu. Indukované napětí v cívce je úměrné změně (derivaci) magnetického toku. Amplituda signálu je přímo úměrná vzduchové mezeře mezi snímačem a ozubeným kolem, velikosti zubů a především otáčkám ozubeného kola. Proto se prahové hodnoty vstupních obvodů v řídicí jednotce dynamicky přizpůsobují otáčkám.



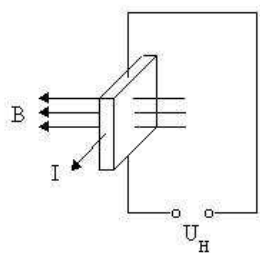
Obr. 1– Indukční snímač otáček a jeho výstupní signál

Hallovy snímače otáček – Magnetostatické snímače

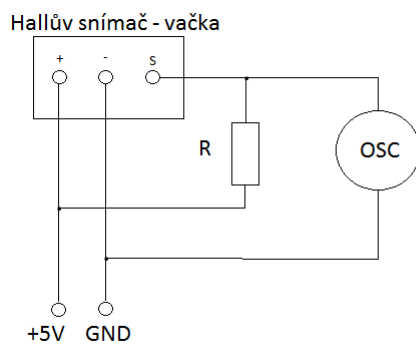
Pro měření stejnosměrného magnetického pole magnetostatickými snímači jsou používány také galvanomagnetické jevy - Hallův jev a Gaussův jev.

Hallův jev se vyhodnocuje pomocí tenkých polovodičových destiček, kterými protéká elektrický proud a zároveň prochází magnetické pole. Jsou-li proud a magnetická indukce na sebe kolmé, lze příčně ke směru proudu naměřit Hallovo napětí U_H , úměrné velikosti magnetického pole. Zároveň se zvyšuje odpor destičky podle parabolické charakteristiky (Gaussův jev, magnetorezistor). Příčinou těchto jevů je působení magnetického pole na elektrony, které jsou nositeli elektrického proudu.

Za použití křemíkové technologie a miniaturizace do integrovaného obvodu je možné tento Hallův prvek přímo zkombinovat se zesilovačem výstupního Hallova napětí a vyhodnocovacím obvodem. Vznikne tak integrovaný Hallův spínač/sonda, která na výstupu poskytuje dvoustavový logický signál.

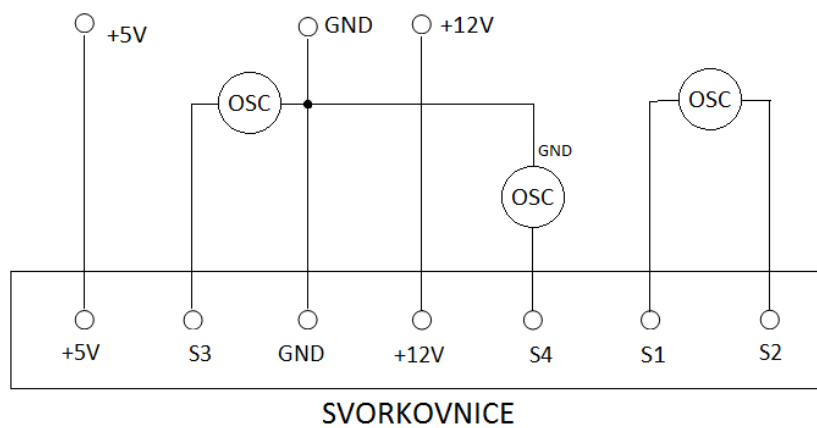


Obr. 2 – Princip Hallova snímače



Obr. 35 – Schéma měřicího zapojení

Schéma zapojení:



Obr. 4. Schéma zapojení

VŠB-TU Ostrava	AUTOMOBILOVÁ ELEKTRONIKA		Fakulta elektrotechniky a informatiky
<i>Datum měření: 21.5.2010</i>	1.	Snímače otáček a polohy	<i>Jména, studijní skupiny:</i>
<i>Hodnocení:</i>			Vojtěch Roh UB3AEL01

Zadání:

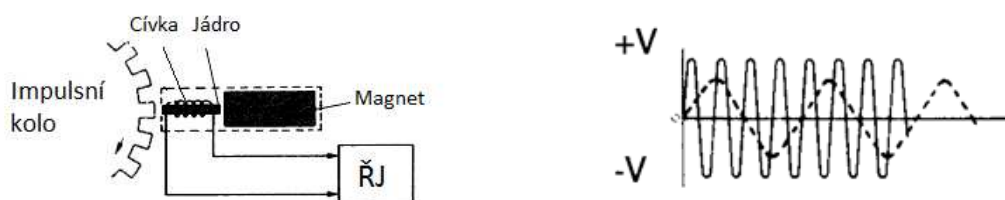
4. Na předloženém přípravku pro ověřování vlastností snímačů otáček a polohy, ověřte statické a dynamické vlastnosti vybraných typů snímačů.
5. Statické vlastnosti
 - Měřením zjistěte vnitřní odpor následujících snímačů:
 - d) snímač polohy klikového hřídele 047 906 433
 - e) snímač polohy vačkového hřídele 03D 907 603
 - f) snímač polohy ujeté vzdálenosti 6QD 919 149A
 - Vyjádřete se k technologickému provedení snímačů(indukční Hallův)
6. Dynamické vlastnosti
 - S využitím osciloskopu analyzujte výstupní signály výše uvedených tří typů snímačů
 - Změřte převodní charakteristiku snímače polohy klikového hřídele(047 906 433)
 $U_{\max} = f(d)$; $n = \text{konst. [ot/min]}$
 U_{\max} ... špičkové napětí (u harmonického průběhu se vyskytuje v $\frac{1}{4}$ a $\frac{3}{4}$ periody)
[V]
d ... velikost vzduchové mezery [mm]
 - Změřte vliv velikosti vzduchové mezery na výstupní signál snímače polohy vačkového hřídele(03D 907 603)
 - Změřte vliv velikosti vzduchové mezery na výstupní signál snímače ujeté vzdálenosti(6QD 919 149A)

Teoretický rozbor:

Indukční snímače otáček

Skládají se obecně ze tří hlavních magnetických součástí: nehybná cívka, část magneticky měkkého železa, trvale magnetická část.

Změna magnetického toku potřebná k vytváření výstupního napětí je způsobována otáčením ozubeného kola. V cívce, která je pevně spojená s permanentním magnetem, se indukují změny magnetického toku střídavé napětí přibližně sinusového průběhu. Indukované napětí v cívce je úměrné změně (derivaci) magnetického toku. Amplituda signálu je přímo úměrná vzduchové mezeře mezi snímačem a ozubeným kolem, velikosti zubů a především otáčkám ozubeného kola. Proto se prahové hodnoty vstupních obvodů v řídicí jednotce dynamicky přizpůsobují otáčkám.



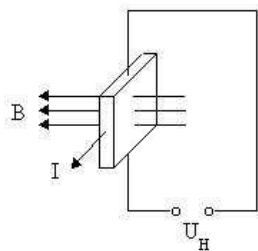
Obr. 1 – Indukční snímač otáček a jeho výstupní signál

Hallovy snímače otáček – Magnetostatické snímače

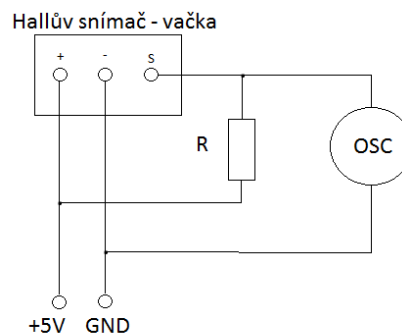
Pro měření stejnosměrného magnetického pole magnetostatickými snímači jsou používány také galvanomagnetické jevy - Hallův jev a Gaussův jev.

Hallův jev se vyhodnocuje pomocí tenkých polovodičových destiček, kterými protéká elektrický proud a zároveň prochází magnetické pole. Jsou-li proud a magnetická indukce na sebe kolmé, lze příčně ke směru proudu naměřit Hallovo napětí U_H , úměrné velikosti magnetického pole. Zároveň se zvyšuje odpor destičky podle parabolické charakteristiky (Gaussův jev, magnetorezistor). Příčinou těchto jevů je působení magnetického pole na elektrony, které jsou nositeli elektrického proudu.

Za použití křemíkové technologie a miniaturizace do integrovaného obvodu je možné tento Hallův prvek přímo zkombinovat se zesilovačem výstupního Hallova napětí a vyhodnocovacím obvodem. Vznikne tak integrovaný Hallův spínač/sonda, která na výstupu poskytuje dvoustavový logický signál..

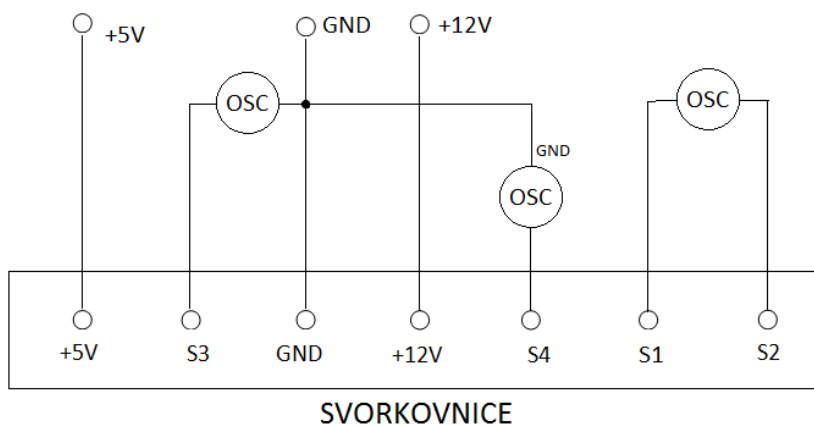


Obr. 2 – Princip Hallova snímače



Obr. 3 – Schéma měřícího zapojení

Schéma zapojení:



Obr. 4 . Schéma zapojení

Použité přístroje a pomůcky:

Osciloskop LeCroy VBA64Xi 600MHz
 Multimetr Agilent
 Posuvné měřidlo
 Klíč plochý 9mm

Postup měření:

Ad 1) Vnitřní odpor snímačů změříme ohmmetrem přiložením na příslušné konektory ve svorkovnici. Například, při měření vnitřního odporu induktivního snímače, přiložíme na svorky S1 a S2. Model při tomto měření není v pohybu.

Ad 2) Pro analýzu signálů ze všech tří snímačů musíme tyto napojit na napájení a připojit sondy osciloskopu. Po připojení všech zařízení a jakmile je měření připraveno, můžeme roztočit model a sledovat průběhy na osciloskopu.

Při proměřování převodní charakteristiky indukčního snímače klikové hřídele a při měření závislosti výstupního signálu na velikosti vzduchové mezery Hallovy snímačů, musíme vždy model zastavit, odšroubovat snímač z uchycení a pomocí podložek změnit vzduchovou mezeru. Velikost vzduchové mezery určíme z celkové tloušťky použitých podložek. Základní mezera bez podložek je nastavena na cca 0,5mm. Po opětovném roztočení modelu na stejné otáčky, můžeme změřit vliv změny na výstupní signál osciloskopem.

Vlastní vypracování:

Ad 1) Měření statických vlastností snímačů

Byly naměřeny následující hodnoty vnitřních odporů:

Název / Typ snímače	Naměřený vnitřní odpor [Ω]
Indukční snímač klik. hřídele / 047 906 433	399
Hallův snímač – vačka / 03D 907 603	1,6M
Hallův snímač – ujeté km / 6QD 919 149A	10M

Tabulka 1 – Vnitřní odpory snímačů

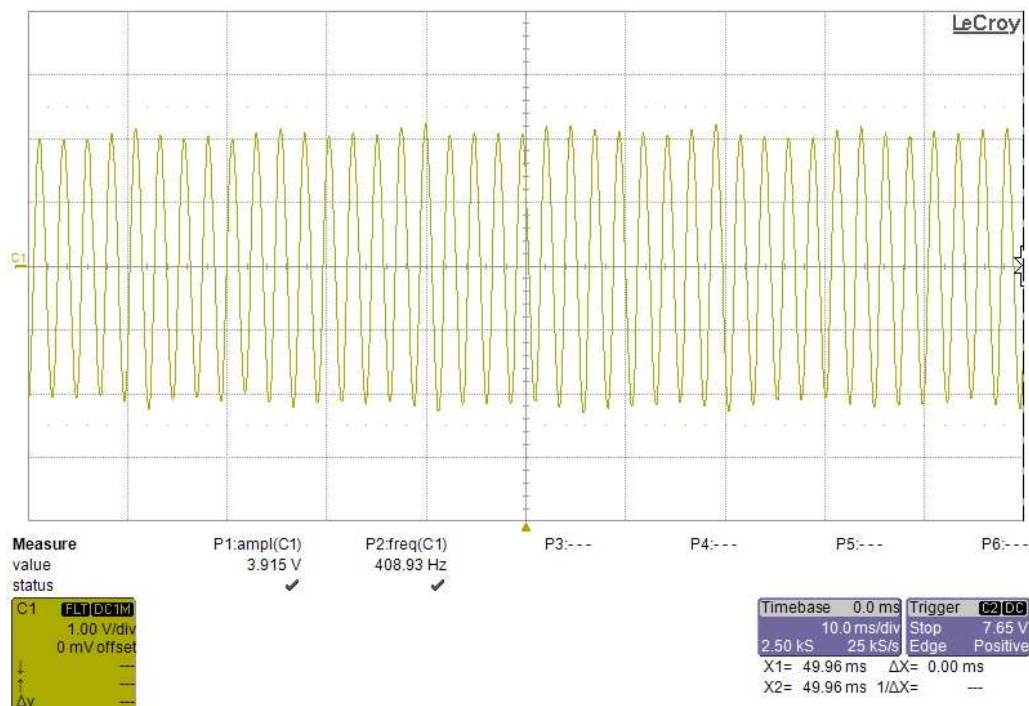
Vyjádření k technologickému řešení snímačů:

Indukční snímač je elektromagnetický generátorový snímač využívající ke své funkci fyzikálního principu elektromagnetické indukce. Skládá se z cívky s jádrem a magnetu. Magnetické pole se uzavírá přes feromagnetické materiály. Má 2 vývody. Nepotřebuje žádné napájecí napětí. Má malý vnitřní odpor a odolnou konstrukci, tyto vlastnosti ho předurčují k použití v nehostinných podmínkách jako je například měření otáček klikového hřídele v bloku motoru.

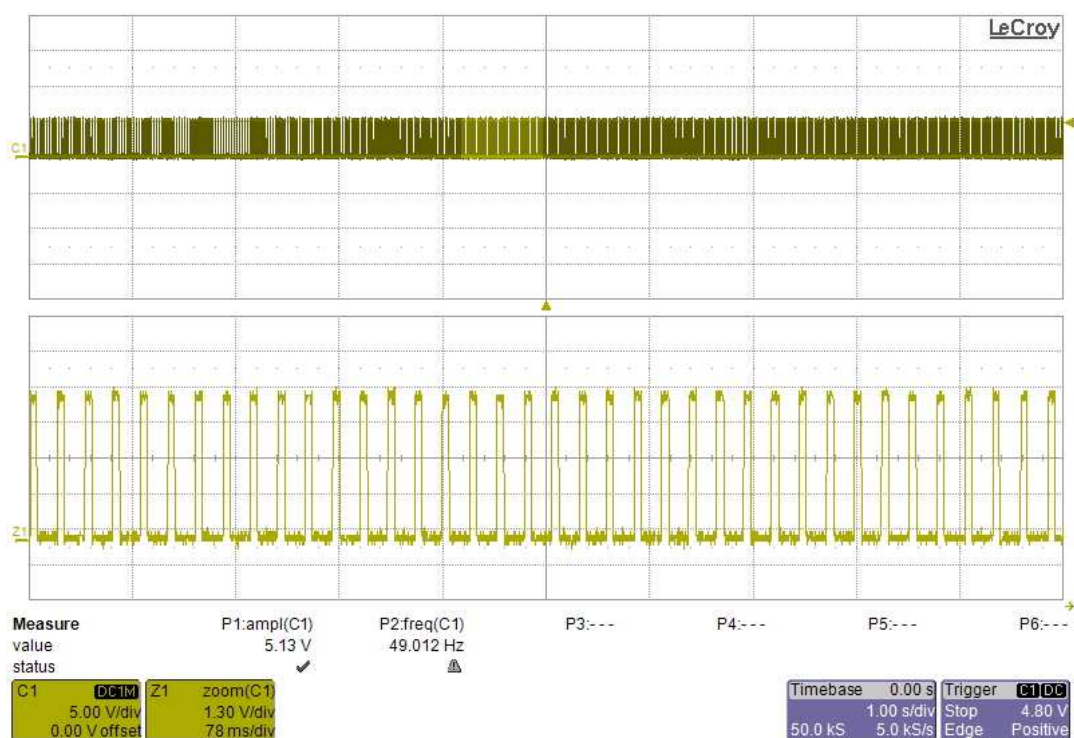
Hallovy snímače využívají ke své funkci fyzikálního principu Hallova jevu, který je popsán výše. K tomuto potřebují konstantní napájecí napětí. Mají 3 vývody. Obsahují vyhodnocovací integrované obvody které poskytují výstupní obdélníkový otáčkový signál. Tento je vhodný k přímému vyhodnocení v ŘJ. Díky této integrované elektronice se nehodí pro aplikace v nevlídném prostředí tak jako indukční snímače.

Ad 2) Měření dynamických vlastností snímačů

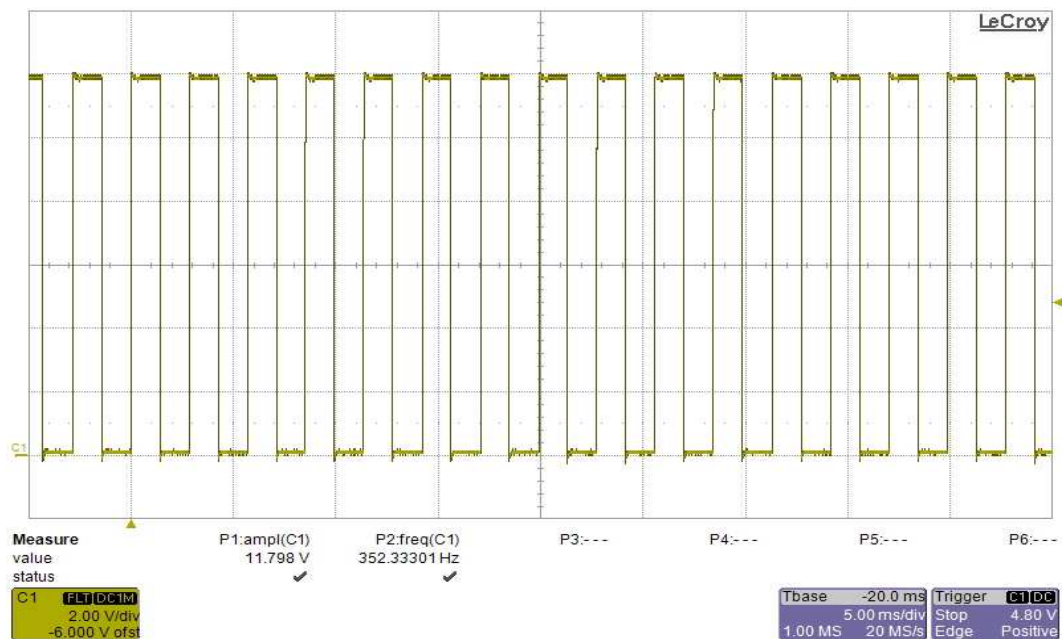
- **Analýza signálů všech tří typů snímačů**



Obr. 5– Výstupní signál indukčního snímače polohy klikového hřídele



Obr.6 – Výstupní signál Hallova snímače polohy vačkového hřídele



Obr. 736 – Výstupní signál Hallova snímače ujeté vzdálenosti

- Měření dynamických vlastností indukčního snímače polohy klikového hřídele 047 906 433

Měření závislosti $U_{\max} = f(d)$; $n = \text{konst}$

Měření probíhalo při konstantních otáčkách 180ot/minutu.

$$n = \frac{f}{z} \cdot 60 = \frac{398,4}{132} \cdot 60 = 180 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

f...frekvence

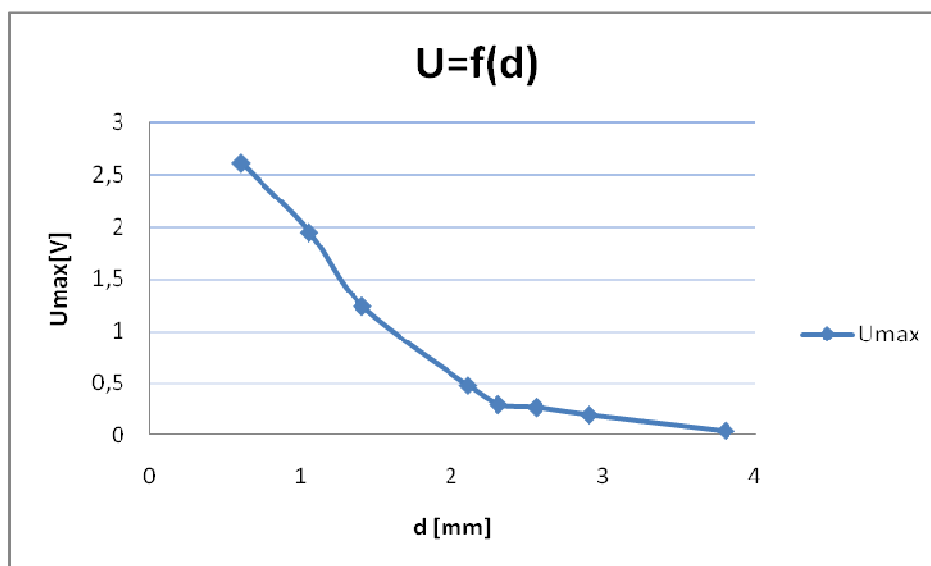
z...počet zubů na měřeném kole (setrvačnick má 132z)

Naměřené hodnoty:

Vzduchová mezera d [mm]	Špičkové napětí U_{\max} [V]
0,6	2,61
1,05	1,95
1,4	1,24
2,1	0,483
2,3	0,299
2,55	0,272
2,9	0,202
3,8	0,05

Tabulka 2 – Tabulka naměřené závislosti $U_{\max} = f(d)$

Graf:



Obr. 8 – graf naměřené závislosti $U_{max}=f(d)$

- Měření dynamických vlastností Hallova snímače polohy vačkového hřídele 03D 907 603

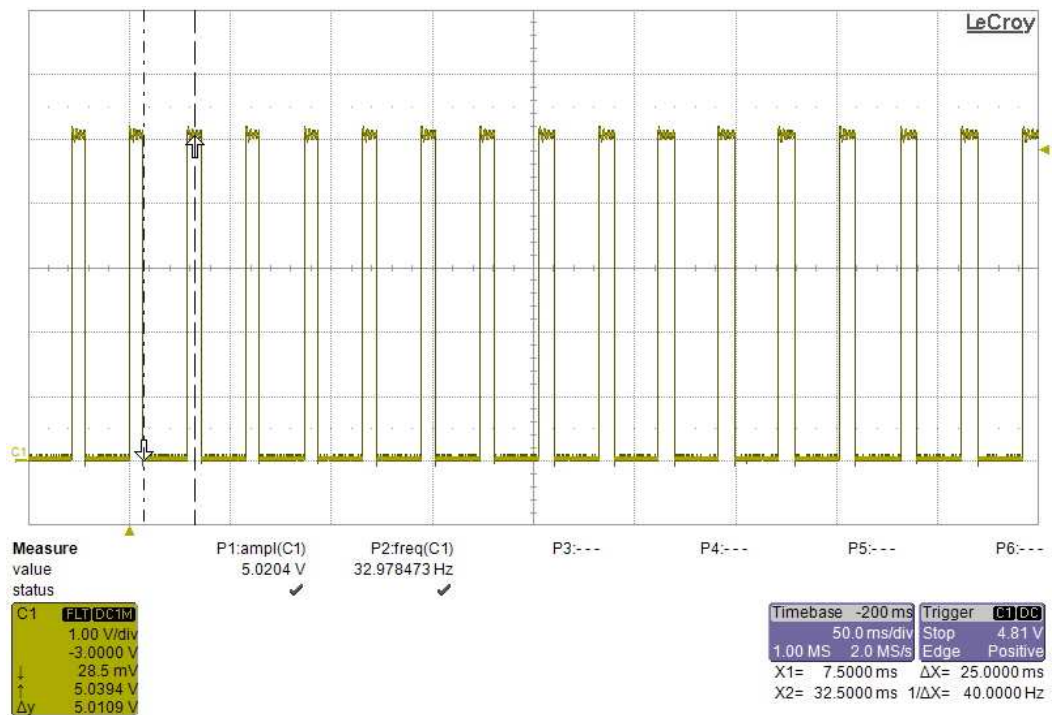
Tabulka naměřené závislosti velikosti vzduchové mezery na výstupní signál:

Vzduchová mezera d [mm]	Stav signálu
0,5	Špatný
0,85	Špatný
1,2	Funkční
1,85	Funkční
2,2	Funkční
2,35	Špatný
2,85	Nefunguje
3,9	Nefunguje

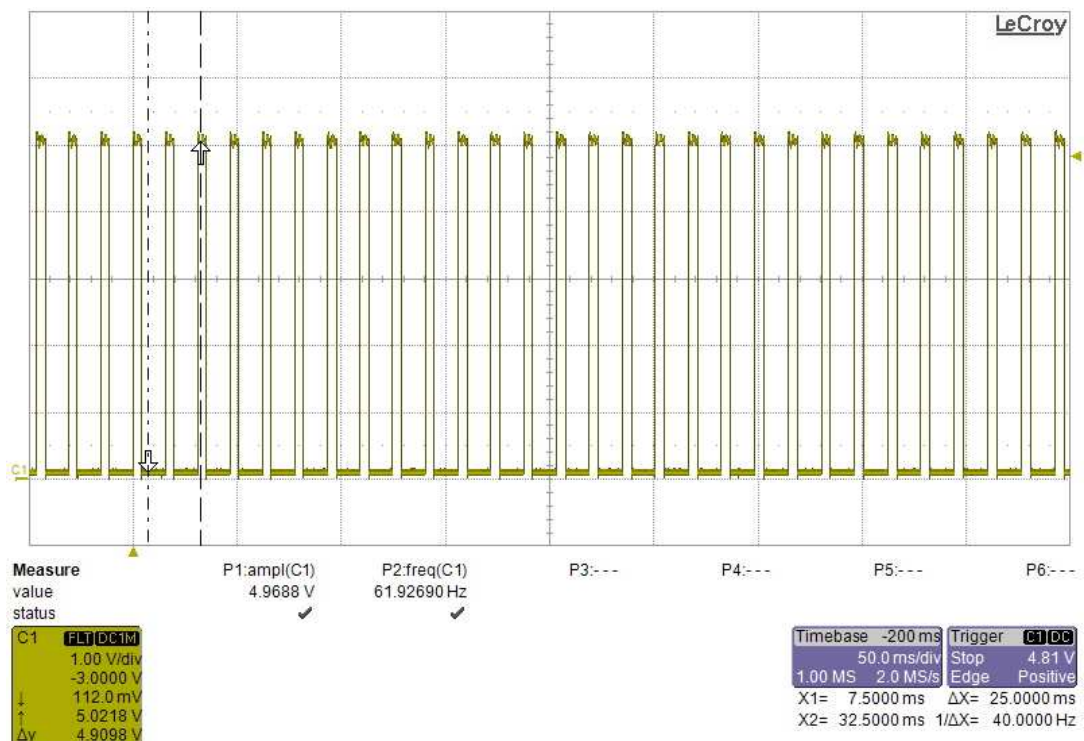
Tabulka 3 – stav výstupního signálu v závislosti na vzduchové mezeře

Špatný ... signál ze snímače je přerušovaný
 Funkční ... signál ze snímače je v pořádku
 Nefunguje ... snímač neposkytuje žádný signál

Příklad naměřených signálů při různých otáčkách:



Obr. 9– Výstupní signál Hallova snímače otáček vačky při 41 ot/min



Obr. 10– Výstupní signál Hallova snímače otáček vačky při 81,8 ot/min

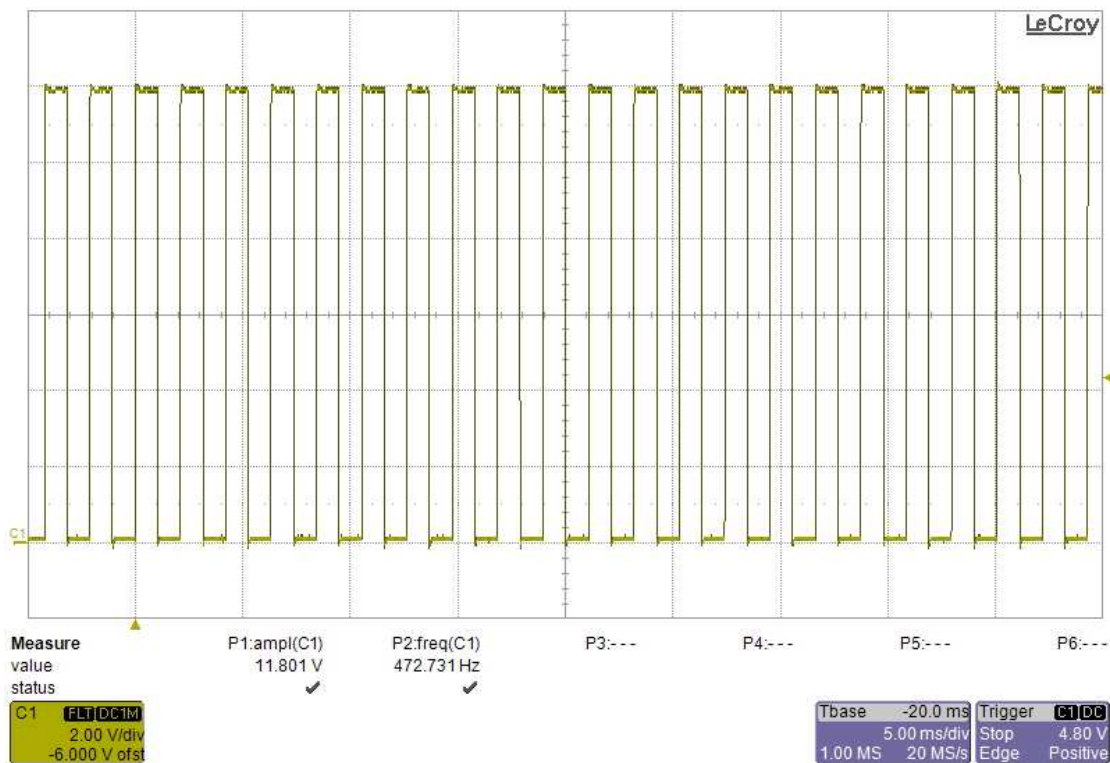
- **Měření dynamických vlastností Hallova snímače ujeté vzdálenosti 6QD 919 149A**

Tabulka naměřené závislosti velikosti vzduchové mezery na výstupní signál:

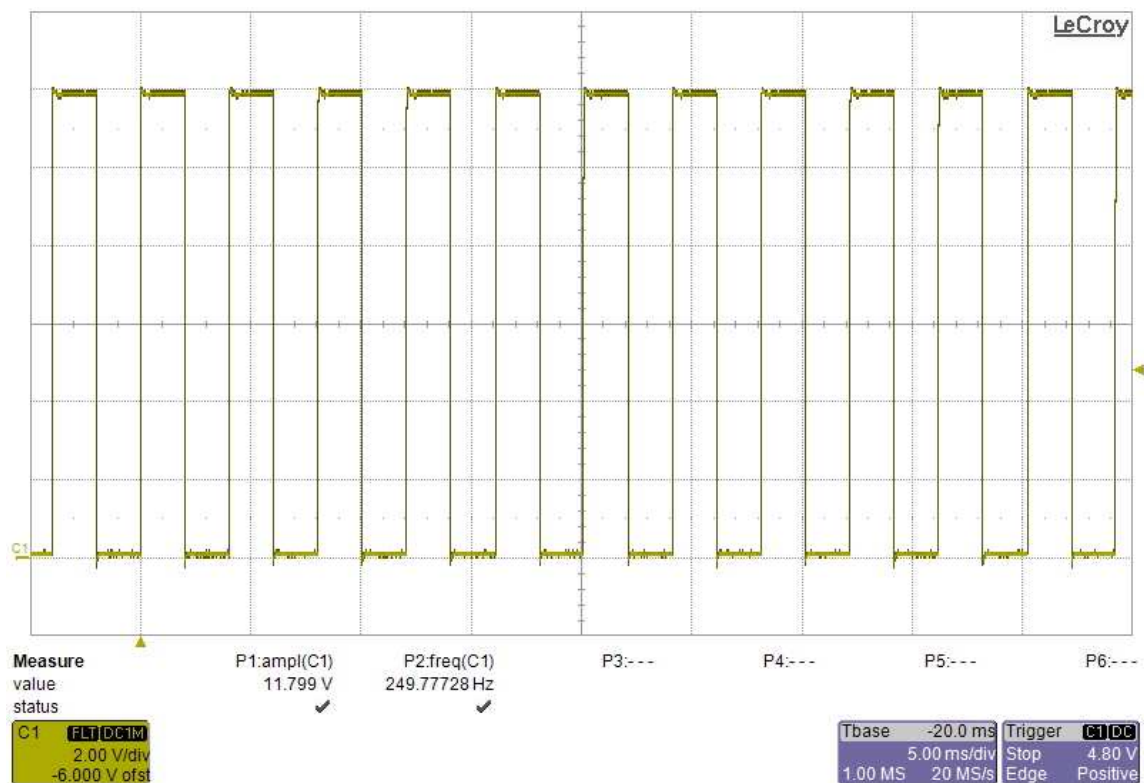
Vzduchová mezera d [mm]	Stav signálu
0,5	Funkční
0,85	Funkční
1,2	Funkční
1,85	Funkční
1,95	Špatný
2,15	Nefunguje

Tabulka 11- stav výstupního signálu v závislosti na vzduchové mezeře

Příklad naměřených signálů při různých otáčkách:



Obr. 12- Výstupní signál Hallova snímače ujeté vzdálenosti při 215 ot/min



Obr. 13 - Výstupní signál Hallova snímače ujeté vzdálenosti při 113 ot/min

Závěr:

Při měření statických vlastností jsme si ověřili fakt, že indukční snímač má malý vnitřní odpor (400Ω), který je daný vlastně převážně jen odporem vinutí cívky. Díky nízkého odporu není tak náchylný na rušení. Zatímco u Hallových snímačů jsme se malých odporů nedoměřili, vykazovaly mezi vývody buďto velmi vysoký odpor nebo nevodivé spojení. Toto je dáno zapojením vnitřní elektroniky snímače.

Při měření dynamických vlastností snímačů jsme prvně analýzou výstupních signálů z jednotlivých snímačů sledovali jejich chování. Indukční snímač poskytuje sinusový signál jehož amplituda je značně závislá na otáčkách. Každému zubu odpovídá jedna perioda signálu. Hallové snímače poskytují obdélníkové signály. Úroveň napětí kladných pulsů je dána velikostí napájecího napětí. Snímač otáček vačky, který je napájen 5V poskytuje výstupní kladné pulsy o napětí úrovně 5V. Snímač ujeté vzdálenosti napájený 12V pak poskytuje pulsy stejné hodnoty. Frekvence signálu všech snímačů je přímo úměrná otáčkám a počtu zubů měřeného kola.

Měřením převodní charakteristiky $U_{\max} = f(d)$ při $n = \text{konst.}$ indukčního snímače jsme dospěli k závěru že úroveň výstupního signálu je kromě otáček značně závislá i na velikosti vzduchové mezery. Se zvětšováním mezery amplituda výrazně klesá. Závislost můžeme označit za lineární.

Měření závislosti velikosti vzduchové mezery na výstupní signál Hallových snímačů prokázalo, že Hallové snímače potřebují k jejich správné funkci přesně definovanou velikost vzduchové mezery v určitém rozmezí. Pokud toto není splněno, snímače poskytují buďto neúplný signál (vynechávají) nebo neposkytují signál žádný. U Hallova snímače vačky bylo toto rozmezí vzdálenosti, kdy snímač pracuje korektně, stanoveno na 1mm – 2,2mm. Vynechávání signálu je dáno nejspíš přebuzením či špatným buzením obvodu snímače vlivem příliš malé nebo v opačném případě velké vzduchové mezery. Vyhodnocením této skutečnosti řídící elektronikou snímače a jeho následným restartováním. Hallův snímač ujeté vzdálenosti pak potřeboval vzduchovou mezeru menší než 1,9mm